LES INDISPENSABLES DE SCIENCES ET AVENIR - NUMÉRO SPÉCIAL 217 AVRIL/JUIN 2024 - MÉTÉO ET CLIMAT

FRANCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD

LES INDISPENSABLES

SCIENCES ET AVENIR

La Recherche

**CELESTE SAULO**

Secrétaire générale de l'Organisation météorologique mondiale

« L'IA peut améliorer les prévisions, mais l'expertise humaine demeure irremplaçable »

# MÉTÉO et climat

## Le temps qu'il fera demain

**Des prévisions toujours plus précises**

**Cartes de vigilance : anticiper le danger**

**Tempêtes, canicules... l'impact du changement climatique**

**Le guide des meilleures applis**

**D'Azincourt à Waterloo, et s'il avait fait beau ?**

**CAHIER SPÉCIAL** Tout comprendre sur les anticyclones, les dépressions, les tornades, les dômes de chaleur...

GUILLAUME MEGEVAND ; ECMWF, MODÈLE AIFS

NUMÉRO SPÉCIAL 217 AVRIL/JUIN 2024 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD

L 13667 - 217 H - F: 5,90 € - RD

# Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

## Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institut **Curie**

ENSEMBLE, PRENONS
LE CANCER DE VITESSE

### LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

**curie.fr**

**Pour tout renseignement** contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut **Curie**

**BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION** à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

HSSA0424

# Sommaire

GETTY IMAGES

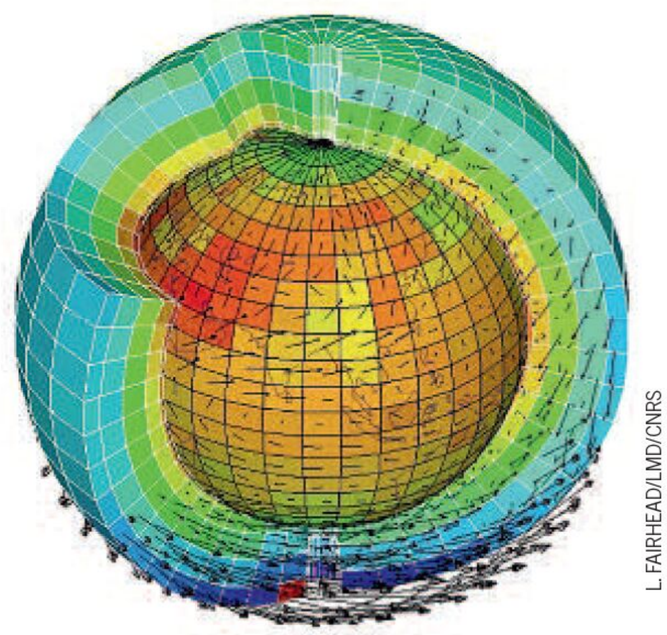
**Quand le ciel se fait le miroir de l'âme** P. 74

DAVID SAUVEUR / AGENCE VU

**Cartes de vigilance : alerter sans se tromper** P. 40

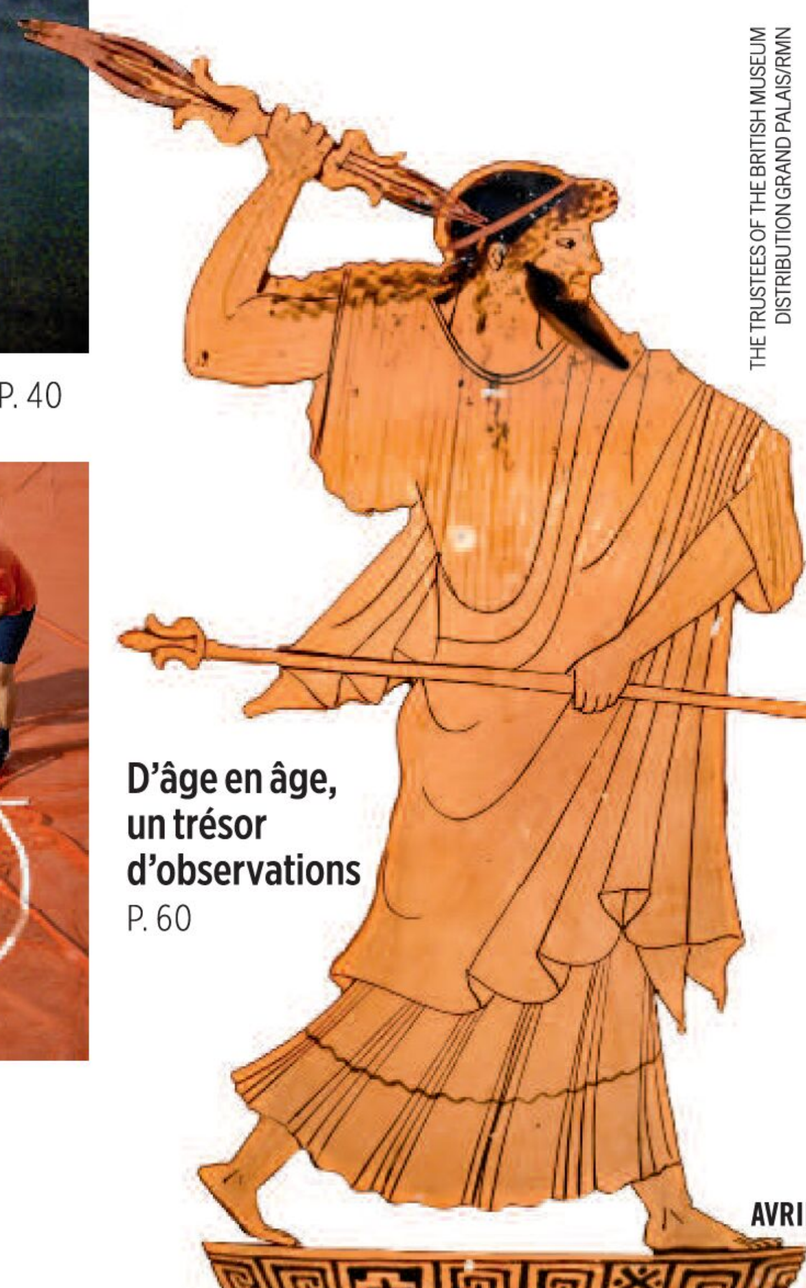
JEAN-FRANCOIS BADIAS/AP/SIPA

**Des prévisions de haute précision** P. 44



L. FAIRHEAD/LMD/CNRS

**Résoudre des équations… qui n'ont pas de solution** P. 34



THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM DISTRIBUTION GRAND PALAIS/RMN

**D'âge en âge, un trésor d'observations** P. 60


5 **Édito**

**6 RENCONTRE**
**Celeste Saulo**
« Devoir gérer l'incertitude est un immense défi »

**10 COMPRENDRE**
**Cartes et infographies**
12 Lire l'avenir dans les cartes du ciel
14 Pression et masses d'air : les maîtres du temps
16 Les grands courants d'air agitent l'atmosphère
18 Les océans, régulateurs du climat mondial
20 Au cœur des nuées
22 À toutes vapeurs !
24 Entre hautes et basses pressions, des appels d'air
26 Et, soudain, le temps tourne à l'orage…
28 Spirales de violence

**30 PRÉVOIR**
32 FERA-T-IL BEAU DEMAIN?
32 Sur terre et dans les airs, recueillir des millions de paramètres
34 Résoudre des équations… qui n'ont pas de solution
36 Faire tourner des supercalculateurs pour produire un résultat parfait
38 Des simulations dopées par l'IA
40 Cartes de vigilance : alerter sans se tromper
42 Le moyen terme, nouvelle cible des météorologues
44 Des prévisions de haute précision
48 Quel temps fera-t-il en 2050 ?
51 **INTERVIEW Robert Vautard**
« Des épisodes caniculaires plus chauds de 4 °C »

**52 PORTFOLIO**
Le fascinant spectacle des éléments déchaînés

**58 VIVRE AVEC SON TEMPS**
60 D'âge en âge, un trésor d'observations
64 Le temps glorieux des pionniers
70 Et s'il avait fait beau ce jour-là ?
74 Quand le ciel se fait le miroir de l'âme
77 **INTERVIEW Martin de la Soudière**
« La météo répond à un besoin de confort »
78 Mourir de chaud, littéralement…
80 Ils font la pluie et le beau temps à la télévision

**82 LES MEILLEURES APPLIS**

# REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

## LE MENSUEL

## LE HORS-SÉRIE

## UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

**Chaque trimestre,** une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

## UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

**Chaque mois,** toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

**Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr**

**39** JOURNALISTES PASSIONNÉS

**19** PARUTIONS PAR AN

**2,5** MILLIONS DE LECTEURS

**2,6** MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

**7,3** MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

**3** APPLICATIONS IOS/ANDROID

## 2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

# La Recherche

## LE TRIMESTRIEL

## LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

**Chaque trimestre,** un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

**Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr**

## TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

**2 sites** au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

**NUMÉRO SPÉCIAL**
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
redaction@sciencesetavenir.fr

**Directrice éditoriale**
Dominique LEGLU 56.02
**Rédacteur en chef Sciences et Avenir**
Mathieu NOWAK 56.38
**Rédacteur en chef La Recherche**
Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
**Rédacteur en chef digital** Olivier LASCAR 56.15

**Rédaction en chef hors-série** Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
**Directrice artistique** Thalia STANLEY 56.21
**Photo-iconographie** Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
**Documentation** Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
**Ont collaboré à ce numéro :**
Grégoire ADER, Jacques-Olivier BARUCH, Laureen BOUYSSOU, Riva BRINET-SPIESSER, Cécile CAZENAVE, Loïc CHAUVEAU, Denis DELBECQ, Caroline DEPECKER, Nicolas GUTIERREZ C., Nicolas HALLEUR, Jean-François HAÏT, Valérie HANDWEILER, Éliane PATRIARCA, Philippe PUISEUX, William ROWE-PIRRA, Vahé TER MINASSIAN, Marie-Laure THÉODULE, Pierre VANDEGINSTE, Agnès VERNET

**Publicité MediaObs** 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79. Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @ mediaobs.com
**Directrice générale** Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
**Directeur de publicité** Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
**Exécution** Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
**Administration des ventes** Catherine FERNANDES 01.44.88.89.20
**Directeur commercial** Valéry SOURIEAU
**Directeur des abonnements** Luc BONARDI
**Responsable des abonnements** Lina QUACH 01.55.35.56.63

**Les Éditions Croque Futur**
**Président, directeur de la publication**
Claude PERDRIEL
**Directeur général** Philippe MENAT
**Directeur éditorial** Maurice SZAFRAN
**Secrétaire général** Jean-Claude ROSSIGNOL

**Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48**
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

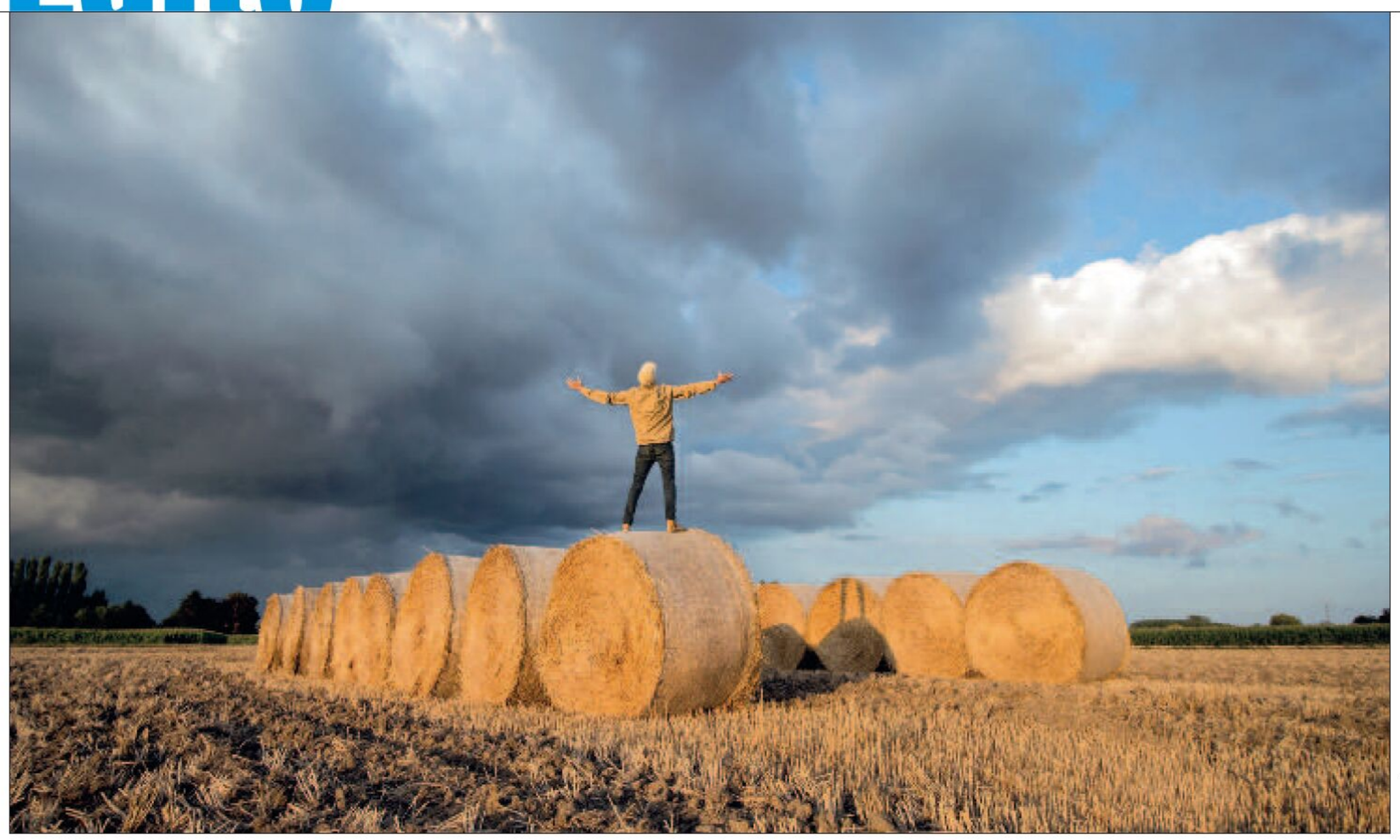
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service Abonnement
45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly Cedex.
Tél. : 01.55.56.71.48.
Tarif des abonnements : France,
1 an simple (12 numéros) : 35 €.
1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €.
Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
**Multimédia :** Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
**Copyright Sciences et Avenir.**
Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par MLP.

PEFC 10-31-1557 Certifié PEFC Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées. pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France Impression, certifié PEFC

ACPM DIFFUSION

# Édito



JARRY / ANDIA.FR

## Les deux visages du ciel

Pile, il y a Zeus brandissant son foudre, animant les cieux de colères homériques s'écoulant en tempêtes et déluges ; mais aussi les poètes chantant les infinis sortilèges du ciel. Face, l'une des sciences les plus incroyablement complexes – et par là même excitante : de la chimie, de la physique, des mathématiques appliquées à ce qu'il y a de plus éphémère, la myriade de phénomènes qui chaque seconde affectent l'atmosphère. Entre ces deux extrêmes, nous sommes là, nous qui contemplons les nuages filant dans le grand bleu, exigeons de savoir si le prochain week-end sera ensoleillé, et prétendons contrôler avec nos applis le temps quotidien. À mi-chemin entre mystère et science.

À la suite de René Descartes qui a, en quelque sorte, inauguré la science moderne en rédigeant sur les *Météores* un traité mathématisant les manifestations célestes – rien de moins ! –, *Sciences et Avenir* a voulu expliquer clairement les phénomènes physiques qui régissent le temps qu'il fait : le pas de deux des anticyclones et des dépressions, le rôle du vent, de l'humidité et de la pression dans la formation des nuages, les équations de la physique qui permettent de construire les modèles indispensables au calcul du temps qu'il fera. Nous avons suivi les météorologues dans leurs efforts constants pour allonger de quelques jours leurs prévisions, en nourrissant quotidiennement leurs supercalculateurs de millions de paramètres. Pas de météo sans prévisionnistes, malgré la suprématie qu'entend prendre l'intelligence artificielle ! Si celle-ci peut fournir une aide bienvenue, jamais elle ne pourra se substituer à ces spécialistes de l'incertitude, seuls capables d'anticiper toutes les implications de leur travail.

Car s'il est un domaine du chaos, c'est bien celui des phénomènes météo, rendu plus imprévisible encore par notre action collective. Nous le savons désormais, les humains sont devenus une force géologique, transformant davantage la planète que les phénomènes géophysiques. Mais ils constituent tout aussi bien une force météorologique : par leurs émissions de gaz à effet de serre, ils font évoluer les grands vents d'altitude et la vitesse des courants marins, déséquilibrent les échanges de chaleur à l'échelle du globe. Et déchaînent plus souvent qu'à leur tour les énergies colossales contenues dans le système Terre.

De ce constat, les autorités météorologiques ont tiré une direction claire, résumée par la nouvelle patronne de la météo mondiale, l'Argentine Celeste Saulo : « *Renforcer les systèmes d'alerte est notre première mission* ». Afin de sauver des vies, bien sûr, mais aussi d'éviter des cataclysmes matériels et financiers. Mais l'urgence est aussi de combattre le changement climatique, sous peine de voir se multiplier les épisodes météo dévastateurs.

Zeus ne règne plus dans son Olympe. Mais bien que privé de tout dieu tempêtant, le ciel nous impose ses ordres : il nous somme de changer nos pratiques. Pour qu'il ne nous tombe pas sur la tête. Et pour que les humains puissent encore s'émerveiller devant le presque rien d'un flocon de neige, sa délicatesse gratuite et à tout jamais inattendue.

**FLORENCE LEROY**

**CELESTE SAULO**

Secrétaire générale de l'Organisation météorologique mondiale

# « Devoir gérer l'incertitude est un immense défi »

En trente ans, les prévisions ont progressé de façon fulgurante, rappelle la météorologue, qui attribue cette réussite tout autant aux avancées technologiques qu'à la coopération entre les nations. Sa priorité à l'OMM, dont elle vient de prendre la tête : renforcer les sytèmes d'alerte.

**Qu'est-ce que la météo a de si passionnant pour que vous ayez décidé d'en faire votre métier… jusqu'à devenir secrétaire générale de l'Organisation météorologique mondiale ?**

J'ai toujours aimé la physique et les mathématiques, mais ce sont des disciplines très abstraites. La possibilité de les combiner avec quelque chose de tangible comme les nuages, le froid ou les tempêtes, de voir les processus physiques à l'œuvre dans la vie réelle, a pour moi été magique ! D'autant que je suis née en Argentine, un pays qui couvre de nombreuses latitudes des zones tropicales à l'Antarctique, avec par conséquent des conditions météorologiques très diverses.

À la fin de mes études, je me suis intéressée à la modélisation numérique et j'ai commencé une carrière d'enseignante et chercheuse, ce qui m'a amenée à me familiariser avec l'OMM par le biais de ses programmes de recherche. J'ai ensuite été choisie par mon gouvernement pour diriger le Service météorologique national argentin, avant d'assumer des fonctions de direction dans ma région et, finalement, à l'OMM elle-même en tant que vice-présidente. Devenir la première femme secrétaire générale de l'OMM a été un long parcours !

**Quels sont vos objectifs pour l'OMM ?**

Le principal est que d'ici à 2030 toutes les nations, en particulier les plus vulnérables, soient plus résilientes face aux phénomènes météorologiques, climatiques et hydrologiques extrêmes. Dans cette optique, le Congrès météorologique mondial de 2023 a fixé une priorité absolue : alerter. Les Nations unies – dont l'OMM est une constituante – ont lancé en 2022 une initiative appelée « Alertes précoces pour tous » qui doit être mise en place d'ici à 2027. Entre 1970 et 2021, les phénomènes extrêmes ont en effet provoqué près de 12 000 catastrophes, entraînant des pertes d'environ 4,3 milliards de dollars et deux millions de morts, dont 90 % dans les pays en développement. Les systèmes d'alerte précoce ne sont donc pas un luxe, mais un outil rentable qui permet de sauver des vies, de réduire les pertes économiques et d'obtenir un retour sur investissement presque dix fois supérieur.

**Concrètement, comment comptez-vous procéder ?**

Question difficile ! Le problème ne se pose pas partout de la même façon. En juillet 2021, l'Allemagne a connu des inondations meurtrières. L'alerte avait été donnée par les services météorologiques, mais les gens n'ont pas pris les mesures qui s'imposaient pour protéger leur vie et leurs biens. Pourquoi ? Parce qu'ils pensaient qu'un phénomène dangereux comme celui-ci pouvait se produire partout dans le monde… sauf chez eux. Qu'il s'agisse de l'Allemagne, de la France, de l'Éthiopie ou de petites îles, il faut donc tenir compte de la façon dont les messages parviennent jusqu'aux personnes touchées. C'est un véritable défi.

Nous avons déjà accompli des progrès, mais il faut poursuivre notre effort, notamment à destination des pays les moins avancés, particulièrement vulnérables. Pour cela, la clé est de travailler directement avec les communautés locales, avec les services météorolo-

> **« Entre 1970 et 2021, les phénomènes extrêmes ont fait deux millions de morts. Il est urgent de renforcer les systèmes d'alerte précoce**

**CELESTE SAULO**

Première femme élue à la tête de l'Organisation météorologique mondiale, organisme de l'ONU basé à Genève, elle a pris ses fonctions le 1er janvier dernier. Docteure en sciences de l'atmosphère, elle dirigeait depuis 2014 le service météorologique national argentin et, depuis 2015, a occupé à l'OMM des fonctions de vice-présidente.

giques et hydrologiques nationaux, et de leur donner les moyens de se concentrer sur l'adaptation au changement climatique et la manière de l'atténuer.
Je souhaite également conduire l'OMM vers un avenir où la voix de chaque membre sera entendue de la même manière. La plupart des pays ont une vision très claire de ce qu'ils veulent faire et de la manière d'y parvenir. Ce dont ils ont besoin avant tout, c'est d'un soutien pour les aider à orienter leurs projets et à renforcer leurs capacités en termes d'infrastructures ou de formation spécifique. Ne venons pas de l'extérieur en prétendant connaître la solution !

**Prenons un exemple… le Burkina Faso. Peu d'argent, d'instruments, probablement peu de stations météo et de personnel qualifié…**
C'est une bonne illustration du rôle de l'OMM. Elle travaille au Burkina avec tous les agents impliqués dans l'un des quatre piliers de l'« Alerte précoce pour tous » : les gestionnaires des situations d'urgence, les services météorologiques, les responsables de la communication et des réponses opérationnelles. Dans ce type de pays, l'OMM peut jouer un rôle important en fournissant des conseils techniques, en amenant les nations voisines à participer à une sorte de coopération Sud-Sud, où les pays se comprennent beaucoup mieux les uns les autres. Nous pouvons également apporter un soutien technique externe et mobiliser des ressources jusqu'à ce que le pays soit impliqué à 100 %.

**Quelles sont les principales avancées réalisées ces dernières décennies dans les domaines de l'observation et de la prévision ?**
Je pourrais commencer par ce que nous appelons les instruments de télédétection, notamment les radars et les satellites. L'impact a été énorme pour la couverture météo de la planète dans sa globalité, car tous les pays n'ont pas les mêmes possibilités d'effectuer des ◆◆◆

◆◆◆ mesures au sol. Ensuite, bien sûr, la prévision numérique du temps, qui repose sur des équations physiques et permet de simuler l'évolution de l'atmosphère sur ordinateur. Et, à partir des années 1980 et 1990, tous les progrès de la prévision d'ensemble, qui consiste à réaliser de multiples simulations afin de déterminer le scénario le plus probable. Lorsque certains grands acteurs mondiaux comme Météo-France ou les services météo des États-Unis, de Grande-Bretagne ou d'Allemagne ont été en mesure de gérer l'incertitude, un immense défi, cela a eu un impact massif sur la qualité des prévisions. Vraiment impressionnant !
Supercalculateurs, utilisation d'algorithmes… La communauté des météorologues a toujours été à la pointe des avancées scientifiques et technologiques, et cela fait vingt ans que nous utilisons l'intelligence artificielle. L'IA peut considérablement améliorer les prévisions. Pour autant, il n'est pas souhaitable de supprimer le facteur humain, car les météorologues apportent une expertise précieuse pour comprendre les limites des modèles ou reconnaître des phénomènes inhabituels. N'oublions pas que ces prévisions ont parfois des implications majeures pour la sécurité publique et la gestion des urgences.

**Quel est l'axe principal de la recherche météorologique aujourd'hui ?**
Un changement fondamental consiste à considérer le système Terre dans son ensemble (atmosphère, cycles hydrologiques, océan, cryosphère, etc.). Ce qui permet d'établir des prévisions à l'échelle de la minute comme à celle de la saison. Et des recherches sont en cours pour modifier la manière dont les alertes météo sont émises, afin qu'elles concernent tous les risques et prennent en compte l'impact des phénomènes. J'aimerais également souligner le travail interdisciplinaire indispensable pour prendre de meilleures décisions. La prévision météo, ce n'est pas seulement de la physique, des mathématiques, de la chimie, de l'océanographie… il faut également comprendre les besoins humains. Les sciences sociales ont donc fait leur apparition dans notre domaine, particulièrement au cours des dix ou quinze dernières années.

**Pouvez-vous nous donner un exemple de cette implication des sciences sociales ?**
Eh bien, en cas d'alerte, lorsque vous prenez la décision de quitter votre maison, vous avez en tête un nombre de pensées incalculables concernant vos biens, ce qu'il faut emporter, etc. S'il ne prend en compte que les phénomènes météorologiques, un système d'alerte, aussi précoce soit-il, ne suffit pas. Il faut qu'il intègre le processus de prise de décision des êtres humains, des humains qui ont peur, qui sont menacés, qui ne savent pas quoi faire. Les sciences comportementales ont donc un rôle à jouer.

**Les prévisions météorologiques sont-elles aujourd'hui optimales ?**
Elles ont beaucoup progressé, grâce à une remontée mondiale des données d'observation de surface et dans l'espace, échangées librement entre tous les pays, et intégrées par des supercalculateurs très avancés dans plusieurs grands centres de modélisation. Ces derniers utilisent des modèles numériques qui reproduisent les interactions physiques de l'ensemble du système Terre. Tous les pays sans exception ont un rôle à jouer. Les acteurs majeurs – les pays développés – qui fournissent des informations au niveau mondial, mais aussi les centres régionaux, par exemple l'Afrique du Sud, l'Argentine ou les pays des Caraïbes, capables de mettre l'accent sur les problèmes… régionaux. Enfin, il est impératif de travailler à l'échelon national. Penser globalement, agir localement. Sans cet effort quotidien et complexe, rendu possible par l'OMM, il serait tout simplement impensable de réaliser des prévisions météorologiques et hydrologiques de qualité.

**Tous les pays peuvent donc fournir et recevoir des données ?**
Oui, c'est la raison d'être de l'OMM. Comme vous savez, le temps n'a pas de frontières… Vous ne pouvez pas empêcher un front froid de passer de la France à la Suisse ! La Suisse a donc besoin d'informations en provenance de France, d'Allemagne, etc. La communauté météorologique a compris très tôt, dès sa naissance il y a cent cinquante ans, l'importance de l'échange de données : vous en fournissez, vous en recevez. Et même si vous ne pouvez en fournir, vous pouvez tout de même en obtenir. De nombreux pays ne disposent pas de satellites mais peuvent recevoir les informations qu'ils envoient. C'est l'un des plus beaux exemples au monde de coopération.

**Météo et climat sont souvent confondus. Pourriez-vous nous rappeler la différence entre les deux ?**
Pour simplifier, la météo est ce que l'on vit, ce que l'on ressent, le temps qu'il fait ; le climat, ce à quoi l'on s'attend. Il y a des nuages, il fait chaud, il pleut, peu importe… Jour après jour, vous pouvez faire des analyses statistiques : température moyenne, nombre moyen de jours de pluie, nombre de jours avec des températures supérieures à 30 °C… Le climat est donc le résultat d'une moyenne d'épisodes météorologiques innombrables. Il vous donne une estimation de ce à quoi vous pouvez vous attendre au printemps dans une ville de France en termes de température, de jours

**« Vous n'empêcherez pas un front froid de passer de la France à la Suisse… Le temps n'a pas de frontières »**

de pluie… Et nous savons bien, maintenant, que des événements climatiques extrêmes, aberrants, surviennent en permanence partout dans le monde. Il s'agit donc d'un changement de climat, d'un changement de moyenne.
À ce sujet, l'une de mes priorités est de renforcer le système mondial d'observation. Nous avons besoin de mesures fiables, approuvées par tous les pays et utilisant une méthodologie qui nous permette d'affirmer avec certitude: « Voilà ce qui se passe pour les émissions de gaz à effet de serre, comment l'atmosphère se comporte, comment les océans réagissent… Cela affecte telle partie du monde de telle façon. »

**Est-il possible de se faire une idée du temps qu'il fera dans vingt ou trente ans ?**
C'est ce qu'évalue le Giec par le biais de scénarios, de projections, etc. Et ce que nous pouvons lire dans ses rapports, c'est que nous nous dirigeons vers un nouveau scénario que nous ne connaissons pas encore. C'est pourquoi la communauté scientifique est très préoccupée, car ces phénomènes risquent d'affecter davantage les citoyens vulnérables du monde entier.

**À votre avis, les dirigeants politiques comprennent-ils l'importance de ces questions ?**
Tout le monde parle de ce qui se passe… sans vraiment réaliser la situation. Essayer d'éviter le pire, c'est humain ! Mais il y a en jeu des intérêts économiques. Des intérêts qui font évoluer le scénario vers quelque chose d'impossible à gérer. Et cela m'inquiète. Les scientifiques ont pourtant bien mis en évidence qu'il n'y a aucun moyen d'atténuer la situation à moins de

> **« Fournir des prévisions : la chose la plus difficile pour n'importe quel scientifique…**

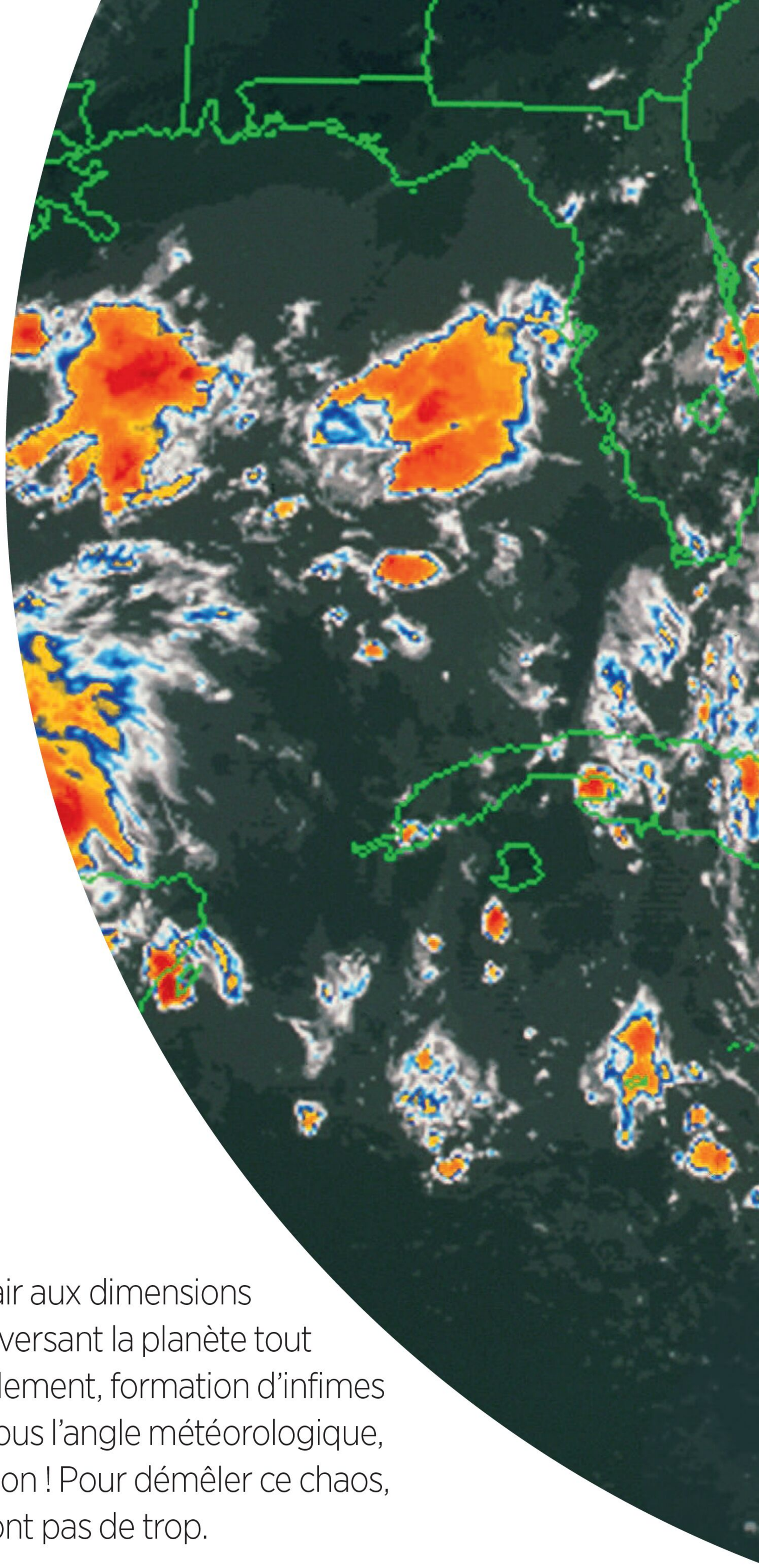
changer radicalement nos manières de consommer et de réduire au minimum l'utilisation des combustibles fossiles. Le message est clair comme de l'eau de roche. Mais vous parliez de politique… L'OMM est considérée comme une organisation technique. Le débat politique se déroule en dehors de notre organisation.

**Quel intérêt portez-vous à l'histoire de cette jeune science qu'est la météorologie ?**
Jeune ? Pas tant que ça ! Aristote a été le premier à parler de météorologie, des météores, les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère. La météorologie est fille de la physique. C'est de la physique appliquée à ce système particulier qu'est l'atmosphère.
Ce que je trouve intéressant, c'est que l'on exige des météorologues de faire des prévisions, contrairement à d'autres scientifiques. La science analyse, évalue, utilise des données, cherche à comprendre. En météorologie, on fait tout cela, mais en plus, on nous demande constamment de prédire l'avenir. Quelle pression ! Certes, nous faisons des erreurs. Est-ce une raison pour ne pas nous considérer comme des scientifiques de haut niveau ? La plupart des chercheurs ne se sont-ils jamais trompés ? On accorde pourtant davantage de crédit à un physicien qu'à un météorologue. S'ils étaient tous invités, comme nous, à se prononcer sur l'avenir, eux aussi seraient dans l'incertitude. En fait, c'est l'aspect le plus original de la météorologie : on vous demande la chose la plus difficile pour n'importe quelle discipline scientifique : fournir des prévisions. Et tout le monde voit immédiatement si vous vous êtes trompé, et commente vos erreurs, et n'a que faire de vos explications… C'est un bon sujet de sciences sociales que de comprendre les attentes de la société à l'égard de connaissances scientifiques telles que la météorologie.

**Malgré les hautes fonctions que vous assumez désormais, avez-vous encore le temps de regarder les nuages ?**
Oui, toujours. Le ciel est invariablement beau. C'est toujours merveilleux de le regarder. Et aussi… À Genève, nous avons eu cette année un hiver doux, avec peu de neige, ce qui est inhabituel. Et je dirais que je suis heureuse – heureuse n'est pas le bon mot… Je trouve positif le fait que les gens prennent ainsi conscience de ce que signifie le changement climatique. Oui, je ressens le temps qu'il fait, et c'est une préoccupation de tous les jours.

**PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA**
**PHOTOS : GUILLAUME MEGEVAND**

# COMPRENDRE

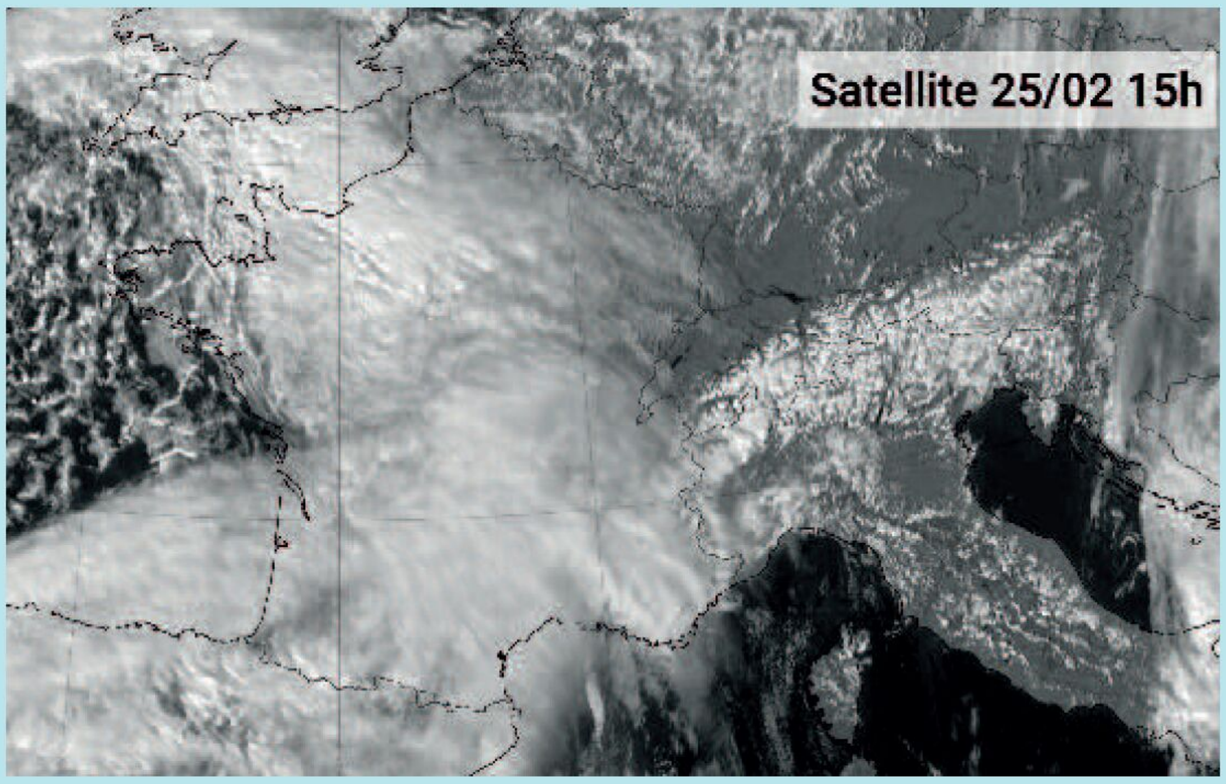


Collisions de masses d'air aux dimensions gigantesques, vents traversant la planète tout entière, mais aussi, localement, formation d'infimes cristaux de glace... Vu sous l'angle météorologique, le monde est un tourbillon ! Pour démêler ce chaos, des explications ne seront pas de trop.

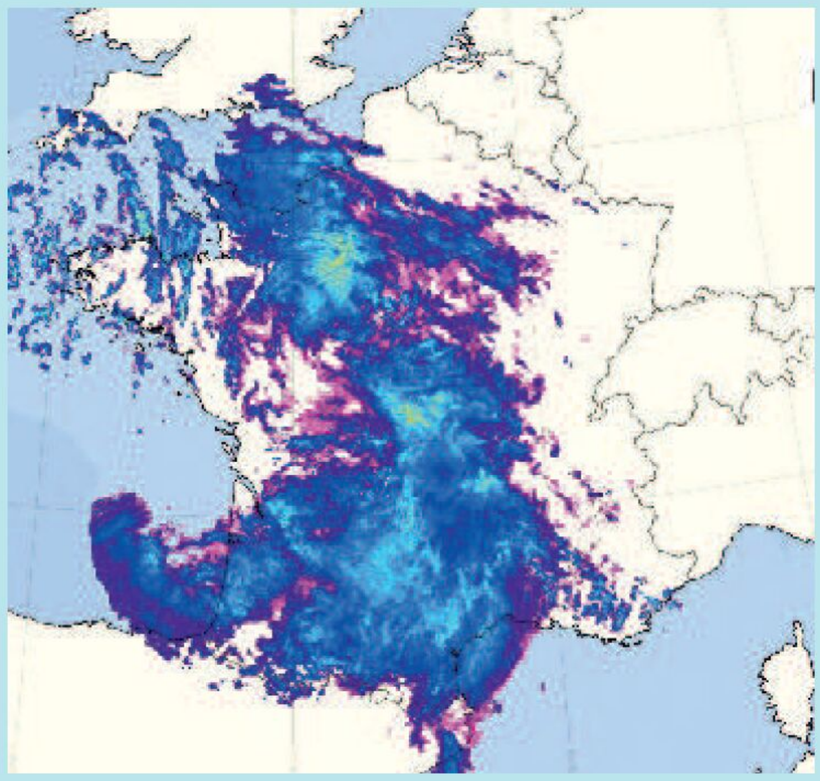
NASA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

**L'ouragan Floyd** au large des côtes de Floride, le 13 septembre 1999, vu sur une image satellite infrarouge colorisée. Les vents s'enroulent autour d'un œil calme représenté en noir et déferlent à 225 kilomètres-heure. C'est un des plus forts cyclones tropicaux ayant jamais existé.

## La situation météorologique du 25 février à 15 heures




**SATELLITE** Cette carte est établie grâce à la quantité de lumière visible rétrodiffusée par les obstacles. La surface de la mer, peu réfléchissante, apparaît en noir. Les sols dégagés, en gris. Les nuages – nuages ne signifiant pas automatiquement pluie ! – semblent d'autant plus blancs qu'ils sont épais.



**RADAR** Il émet des ondes qui rebondissent sur les obstacles rencontrés, ici des gouttes d'eau. Un code couleur, du bleu pâle (modéré) au magenta, indique la force des précipitations.

# Lire l'avenir dans les cartes du ciel

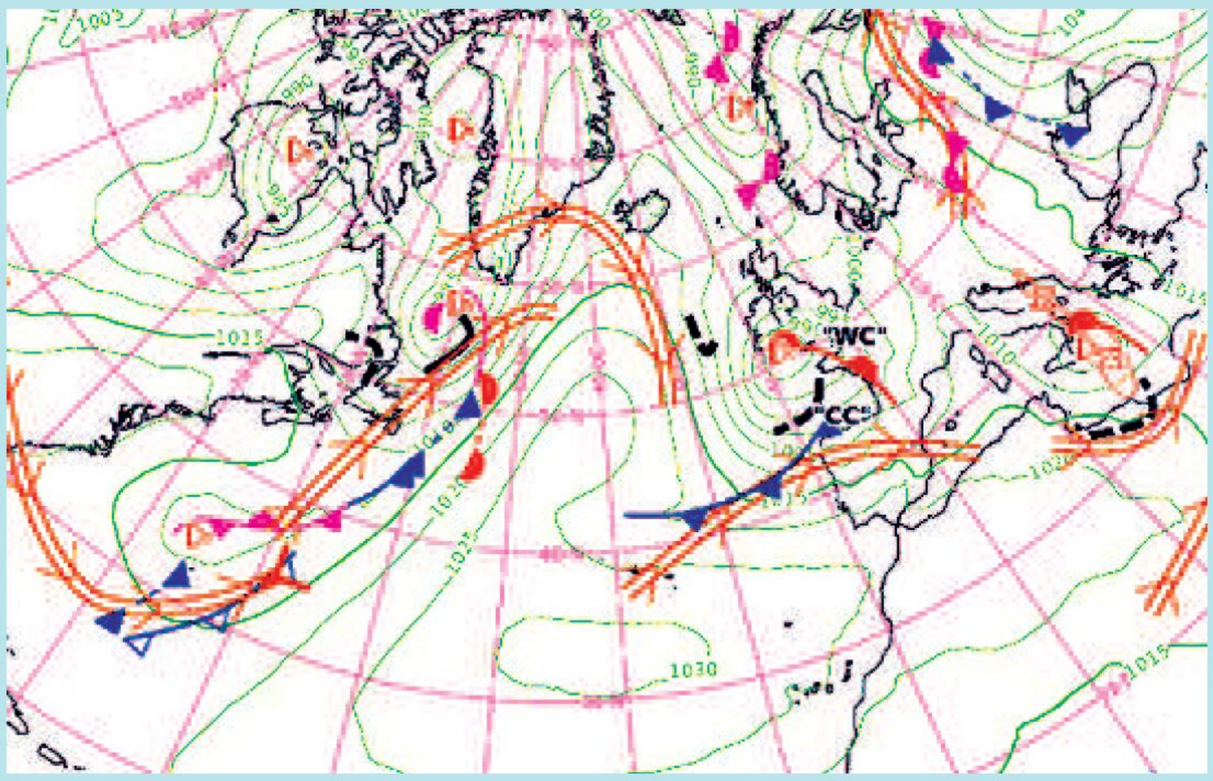
Les animations satellite et radar décryptées par les prévisionnistes sont bien plus précises que les cartes présentées chaque jour au bulletin météo. Entretemps, des milliers d'informations ont été synthétisées.

Comprendre le temps qu'il va faire, c'est avant tout une histoire d'air… Car la météo est d'abord la science de ce qui arrive à ce mélange de gaz, composé de molécules plus ou moins agitées – cette agitation, c'est ce qu'on appelle la température. Dans l'air froid, les molécules sont plus stables, plus proches les unes des autres. Pour un même volume, l'air froid sera donc plus dense que l'air chaud, dont les molécules circulent plus rapidement. Celui-ci pèse moins lourd : on dira que sa pression est moins élevée. Étant plus léger, il monte plus rapidement. Et peut contenir davantage d'humidité sous forme de vapeur d'eau. Température, humidité, pression *(lire p. 14)*, vent *(lire p. 24)* – qui n'est rien d'autre, essentiellement, que le courant s'établissant des hautes vers les basses pressions… Ces quatre paramètres sont les ingrédients de base de toute situation météorologique locale, également sous la dépendance de phénomènes qui se déroulent à l'échelle de la planète tout entière *(lire p. 14-19)*.

Ils permettent de comprendre ce que sont les dépressions et anticyclones, comment se forment les nuages *(lire p. 20-21)* ou les dômes de chaleur *(lire p. 29)*, pourquoi il fait beau…

### Un imageur à des kilomètres au-dessus de nos têtes

Et ce sont eux que l'œil exercé pourra retrouver sur les cartes et animations météo de son application préférée. En vedette, bien sûr, la carte « classique », indiquant la situation à grand renfort de symboles clairs. En parallèle, des animations satellite et radar sont souvent proposées. La première est basée sur le principe de la réflexion de la lumière : à des kilomètres au-dessus de nos têtes *(lire p. 32-33)*, un imageur mesure le rayonnement provenant de la surface terrestre, différent selon les objets rencontrés. Ainsi la mer sera vue noire, les nuages plus ou moins blancs selon leur épaisseur et leur altitude. Une animation satellite pourra montrer aussi, par exemple, la présence probable d'un anticyclone si les




**CARTE SYNTHÉTIQUE** Les traits verts figurent les courbes isobares, reliant les points de pression égale ; les D rouges, les dépressions ; les fronts sont repérés en rouge (chaud) et bleu (froid). C est le nom de l'onde pluvieuse, chaude (WC) ou froide (CC) ; les traits orange indiquent le courant-jet d'altitude.

MÉTÉO FRNACE

**CARTE « ÉPURÉE »** Elle est destinée à être facilement compréhensible par tout un chacun. Nuages, soleil, vitesse et direction du vent, précipitations : les symboles y sont évidents.

nuages tournent dans le sens des aiguilles d'une montre.
Deuxième type d'animation courante, celle réalisée par radar, qui localise les masses humides. Le radar émet des ondes qui rebondissent sur les obstacles rencontrés, gouttelettes de pluie ou cristaux de neige. En calculant le temps de trajet aller et retour des ondes, il permet donc de déterminer à quelle distance, et en quelle quantité, se trouvent ces précipitations. Tous ces éléments, assortis de millions d'observations recueillies par d'autres types d'instruments, permettront de réaliser une carte synthétique, celle que voit le prévisionniste.
Un dernier mot: qu'est-ce que l'indice de confiance ? Il est le fruit de ce qu'on appelle la prévision d'ensemble. Une prévision, en effet, se réalise toujours à partir d'un état initial de l'atmosphère, comprenant… des myriades de paramètres. Les météorologistes élaborent donc de multiples scénarios en faisant varier les données de départ. Ils peuvent ainsi quantifier l'incertitude de la prévision et assortir celle-ci d'un indice de confiance, sur une échelle de 1 (confiance très faible) à 5. **FLORENCE LEROY**

**LEXIQUE**

**Front** Surface séparant deux masses d'air de température, de pression ou d'humidité différente.

**Courants-jets** ou jet streams. Vents soufflant d'ouest en est entre 8 et 12 kilomètres d'altitude. Ils ont un rôle majeur dans la formation des dépressions.

**Anticyclone** Zone de pressions plus élevées qu'aux alentours, souvent associée à un temps dégagé.

**Dépression** Zone de basses pressions, à l'origine de courants ascendants favorisant la formation de nuages.

**Isobares** Lignes reliant les points de même pression.

## Bientôt, la météo de l'espace dans tous les bulletins ?

**17 juillet 2023. Alerte ! Tempête géomagnétique d'ampleur ! Trois éruptions solaires survenues la veille ont déclenché un orage de catégorie X – le niveau le plus élevé sur l'échelle de ces manifestations célestes – et de fortes perturbations sont annoncées sur les réseaux électriques… Éjectés dans l'espace par notre étoile lors d'une éruption, ces « vents solaires », flux de particules chargés électriquement, sont plus connus pour se manifester par de superbes aurores teintées de vert qui illuminent notre ciel quand ils pénètrent, aux pôles, dans la haute atmosphère terrestre. Fréquentes en période de forte activité solaire, ces tempêtes modifient le champ magnétique de la Terre. Elles produisent de puissants courants électriques susceptibles de griller lignes téléphoniques et transformateurs – pouvant provoquer des pannes géantes – mais aussi de perturber la propagation des ondes dans la haute atmosphère, brouillant systèmes radars, antennes -relais et signaux GPS. Ces éruptions endommagent par ailleurs les panneaux solaires des satellites, influent sur leur orbite, et exposent pilotes d'avion et astronautes à des risques accrus d'irradiation. La mission Vigil que l'Agence spatiale européenne (ESA) lancera d'ici quelques années surveillera ces colères pour mieux protéger les engins en orbite et les infrastructures terrestres. De quoi peut-être, un jour, ajouter un point « météo de l'espace » au bulletin météo quotidien…** **LAUREEN BOUYSSOU**

# Pression et masses d'air : les maîtres du temps

Grand bleu ou tempête, froid glacial ou douceur printanière… Les conditions météorologiques sont dictées par les variations de la pression atmosphérique et la rencontre permanente de gigantesques masses d'air.

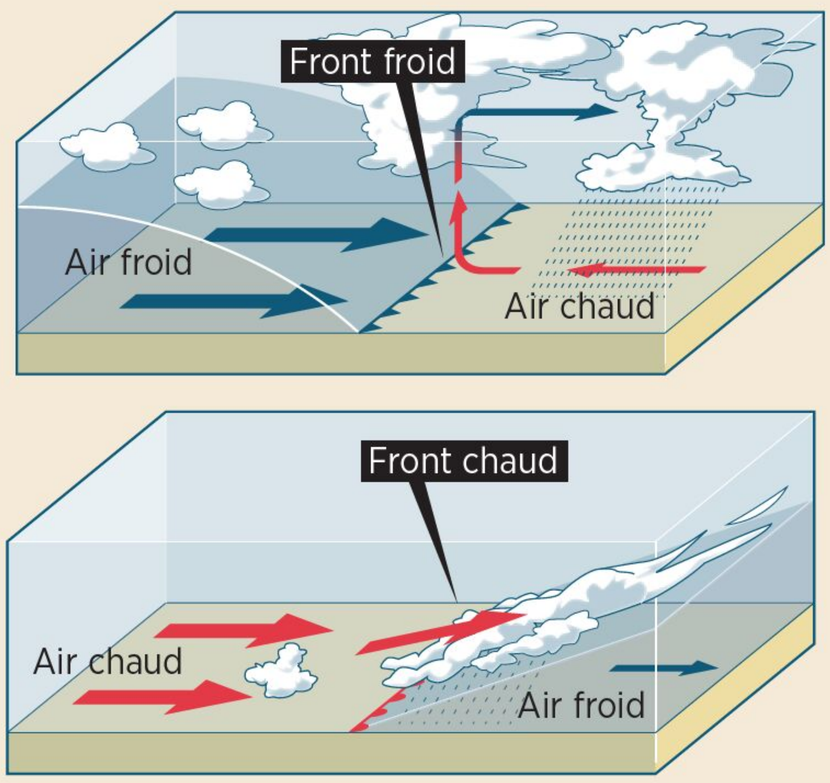
MASSES D'AIR

## L'AIR CHAUD PREND LE DESSUS

L'atmosphère de la Terre n'est pas homogène. Elle est constituée d'une mosaïque de masses d'air mobiles atteignant plusieurs milliers de kilomètres de longueur pour quelques kilomètres de haut. Selon qu'elles sont situées au-dessus des océans, des calottes glaciaires ou des continents, elles diffèrent par leur température et leur humidité. Ces masses peuvent se rejoindre. Leur surface de contact est appelée un front.

Dans le cas d'un front dit « froid », la masse d'air froid, plus dense, passe rapidement sous la masse d'air chaud en la soulevant. Celle-ci se rafraîchit alors et des nuages de type cumulus ou cumulonimbus se forment, associés à de fortes précipitations.

Dans le cas d'un front « chaud », une masse d'air chaud pousse lentement une masse d'air froid tout en la recouvrant. Des nuages de type cirrus se forment, suivis de précipitations modérées. Sur les cartes météo, les fronts froids sont représentés par des triangles bleus le long des lignes isobares (de même pression) et les fronts chauds par des demi-cercles rouges. Il existe deux autres types de front : « occlus », lorsque le front chaud est coincé entre deux fronts froids (demi-cercles et triangles violets sur les cartes météo), avec de faibles précipitations, et « stationnaire » quand deux masses d'air de température différente se croisent lentement sans interagir (en bleu et rouge sur les cartes), avec un temps couvert.



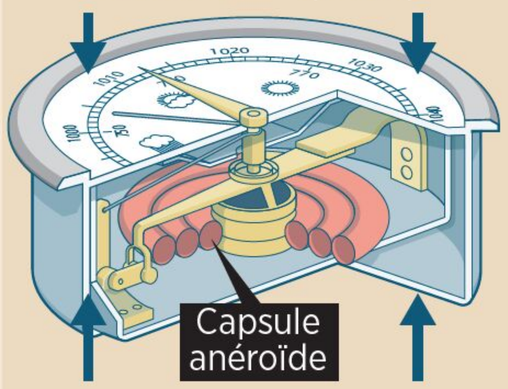

**Fronts froid et chaud** rythment les températures et les précipitations.

MESURES

## COMMENT FONCTIONNE UN BAROMÈTRE ?

Inventé par le physicien italien Toricelli en 1643, le baromètre mesure le poids de la colonne d'air à son aplomb, donc la pression atmosphérique. Les premiers baromètres étaient constitués d'un tube contenant du mercure et plongé dans un bassin rempli de ce même métal. La hauteur du mercure dans le tube traduisait la pression s'exerçant sur le bassin. Aujourd'hui, on utilise le baromètre dit « anéroïde ». Il repose sur une capsule élastique dans laquelle on fait un vide partiel. Sa déformation sous l'effet des variations de pression est transmise à une aiguille, pour les baromètres classiques, ou mesurée par des capteurs.

Pression atmosphérique




**La capsule** (en orangé) se déforme sous l'effet des variations de pression. La déformation est amplifiée par un levier qui la transmet à l'aiguille.

RECORDS

**870 hPa**
**La pression la plus basse**
jamais mesurée, près du typhon Tip aux Philippines, en 1979.

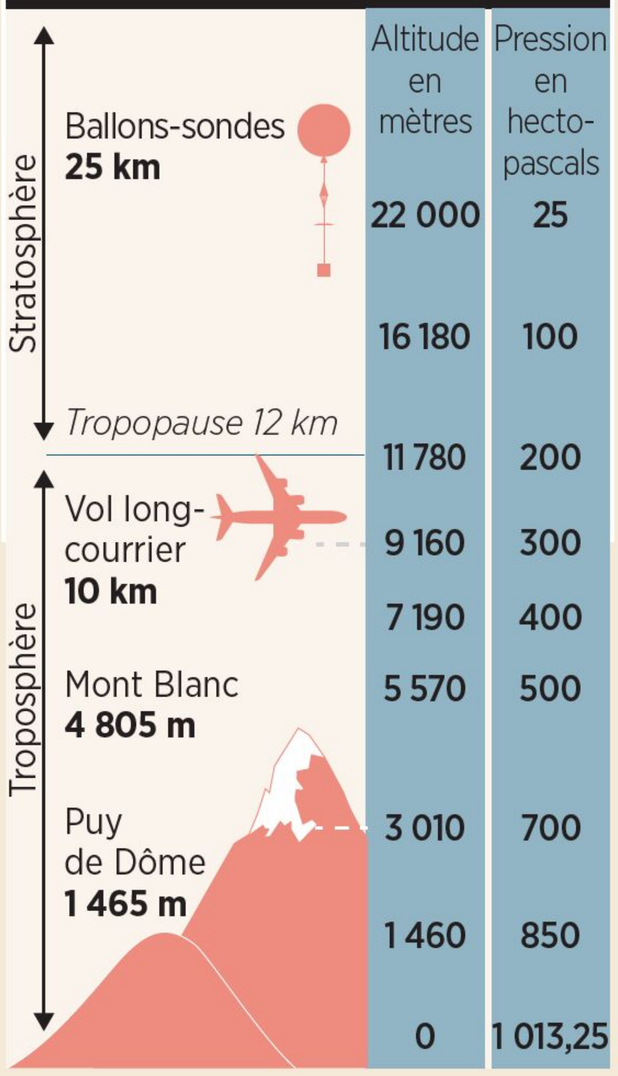
**1084 hPa**
**La pression la plus élevée**
jamais mesurée, dans une station météo en Mongolie, en 2001.

Dépression d'Islande
Anticyclone canadien
Océan Atlantique
Anticyclone des Açores
Anticyclone de Sibérie
Dépression des Aléoutiennes
Anticyclone d'Hawaï
Océan Pacifique
Océan Pacifique
Océan Indien
Anticyclone de Sainte-Hélène
Anticyclone des Mascareignes
Anticyclone de l'île de Pâques
Océan Austral
Zones de basses pressions
Zones de hautes pressions

# Anticyclone ou dépression ?

La pression atmosphérique est le poids exercé par la colonne d'air au-dessus de nos têtes. Au niveau de la mer, la pression moyenne est de 1013 hPa (hectopascals). Si elle est supérieure, c'est une situation d'anticyclone. De l'air froid descend des couches supérieures de l'atmosphère, générant du vent qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre (dans l'hémisphère nord). Les conditions sont stables, le vent est faible, le ciel dégagé. Si la pression est inférieure à 1013 hPa, c'est une situation de dépression. L'air chaud proche de la surface monte. Or, plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau. Des nuages se forment. Le vent tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Le temps est couvert, agité, pluvieux. Outre cette origine thermique, anticyclones et dépressions peuvent aussi se former du fait de phénomènes dynamiques : convergence ou divergence de vents à très haute altitude, effet de barrière des massifs montagneux… Dans l'hémisphère sud, les sens de rotation du vent sont inversés.

**Variation verticale de la pression atmosphérique**




**La pression diminue** avec l'altitude. La plupart des phénomènes météorologiques se produisent dans la couche la plus basse de l'atmosphère, la troposphère, et jusqu'à la tropopause, à environ 12 000 mètres d'altitude, qui marque la frontière avec la stratosphère.

**Oscillation négative**




**Oscillation positive**




OSCILLATION NORD-ATLANTIQUE

## EN HIVER, LA MÉTÉO EUROPÉENNE SUR COURANT ALTERNATIF

L'oscillation nord-atlantique (ONA) désigne le mouvement de fluctuation entre une zone de basses pressions, la dépression d'Islande, et une zone de hautes pressions, l'anticyclone des Açores, au large du Portugal. Elle joue un grand rôle dans la météo hivernale. À gauche, l'ONA est en mode « négatif » quand la dépression d'Islande (en bleu) et l'anticyclone des Açores (en rouge) sont faibles. Le courant d'altitude (courant-jet ou jet stream, *lire p. 16-17* ) traverse une zone froide, est bloqué par une zone de hautes pressions puis redescend et provoque un temps froid et sec sur le nord de l'Europe et un temps chaud et humide sur le sud. À droite, le mode positif : quand la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores sont forts, le courant-jet n'est pas dévié. Il provoque un temps chaud et humide sur le nord de l'Europe et un temps froid et sec sur le sud.

Pages réalisées par Jean-François Haït
Infographies : Philippe Puiseux

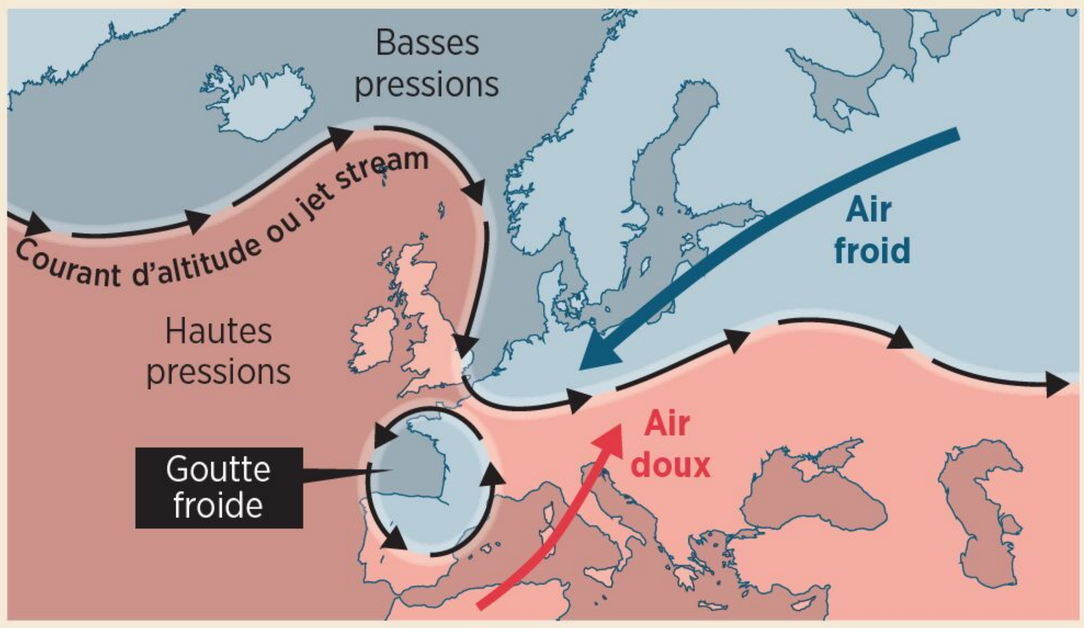
# Les grands courants d'air agitent l'atmosphère

Issue de la rotation de la Terre et de l'insolation inégale de l'atmosphère, la circulation des courants-jets – de puissants vents soufflant en altitude – influence fortement la météo de nos latitudes moyennes.

GOUTTE FROIDE

## LE CAUCHEMAR DES PRÉVISIONNISTES

En circulant autour de la Terre, il arrive que le courant-jet polaire *(voir ci-contre)* se déforme et qu'une poche d'air très froid (entre -20 et -36 °C) s'en détache. Située aux alentours de 5000 mètres d'altitude et baptisée « goutte froide » par les météorologues, elle peut descendre vers des latitudes plus basses, jusqu'à entrer en contact avec des masses d'air plus chaud. Des nuages comme les cumulus et cumulonimbus se forment alors. Il en résulte un temps perturbé : averses, grésil ou grêle, neige et vents parfois forts. La goutte froide peut durer plusieurs jours. Elle se déplace lentement et d'une manière difficile à prédire par les modèles météorologiques. Le phénomène peut aussi se produire en été : en juillet 2021, de très fortes précipitations ont causé d'importantes inondations notamment en Belgique et dans l'ouest de l'Allemagne.



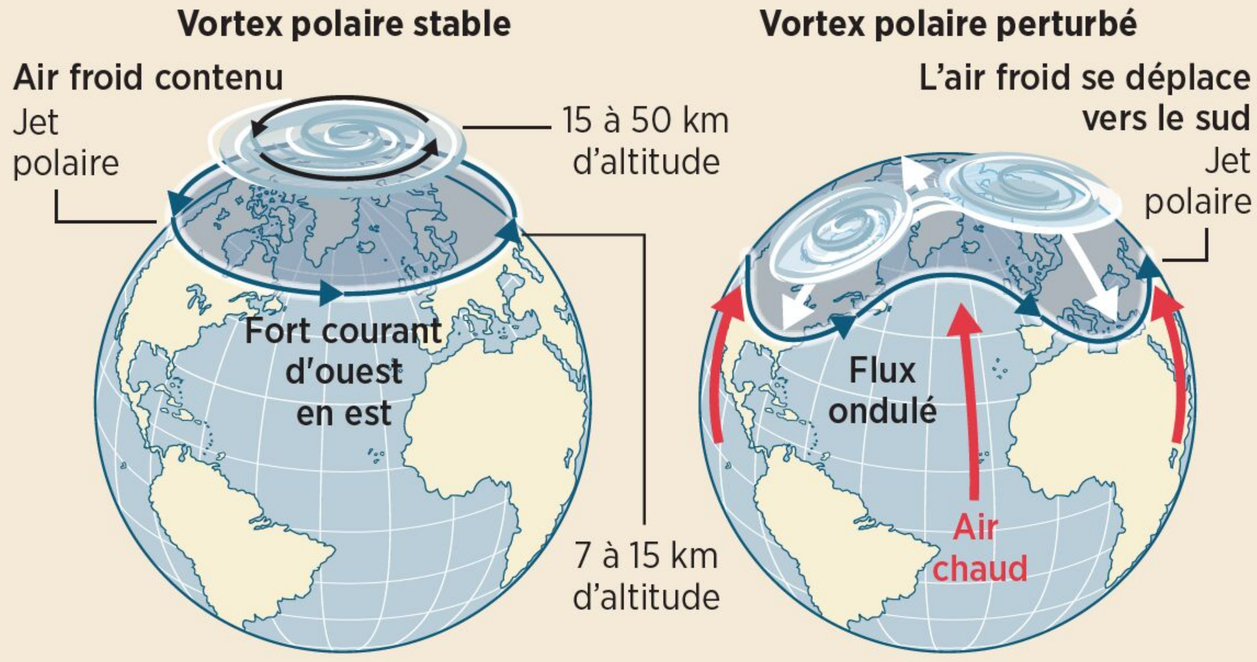

**Poche d'air froid** et de basse pression, la goutte froide crée de fortes perturbations.

VORTEX POLAIRE

## UN GÉNIE DU FROID VENU DE LA STRATOSPHÈRE

En hiver, au niveau des pôles, une zone d'air froid se forme à environ 30 kilomètres d'altitude. C'est le vortex polaire. Il est maintenu par la circulation d'un courant de très haute altitude, le jet stratosphérique de la nuit polaire. Ce dernier est situé au-dessus du courant-jet polaire et tourne dans le même sens.

La température du vortex polaire augmente en été, et il se fragmente, avant de se reformer dès l'automne. Cependant, il peut arriver, même en hiver, que la température de la stratosphère remonte brutalement sous l'effet de mouvements de l'atmosphère à très grande échelle. Elle peut ainsi passer de -80°C à -20°C en quelques jours : c'est ce que les météorologues appellent le « réchauffement stratosphérique soudain ». C'est alors que le sens de rotation du jet stratosphérique de la nuit polaire peut s'inverser et perturber le courant-jet. Celui-ci capte alors de l'air très froid qui est déversé sur l'Europe, comme cela s'est produit en France en février 2012.




### ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT?

Dans son rapport publié en 2021, le Giec indique que « *différents aspects de la circulation atmosphérique ont probablement changé depuis le milieu du XXe siècle* » et note par exemple que les deux cellules de Hadley ont tendance à s'étendre en direction des pôles. L'attribution de ce changement aux activités humaines ou à une variabilité naturelle du climat n'est pas évidente. Une telle extension pourrait provoquer des sécheresses dans les régions concernées (bassin méditerranéen, sud de l'Afrique, Amérique du Sud, notamment.

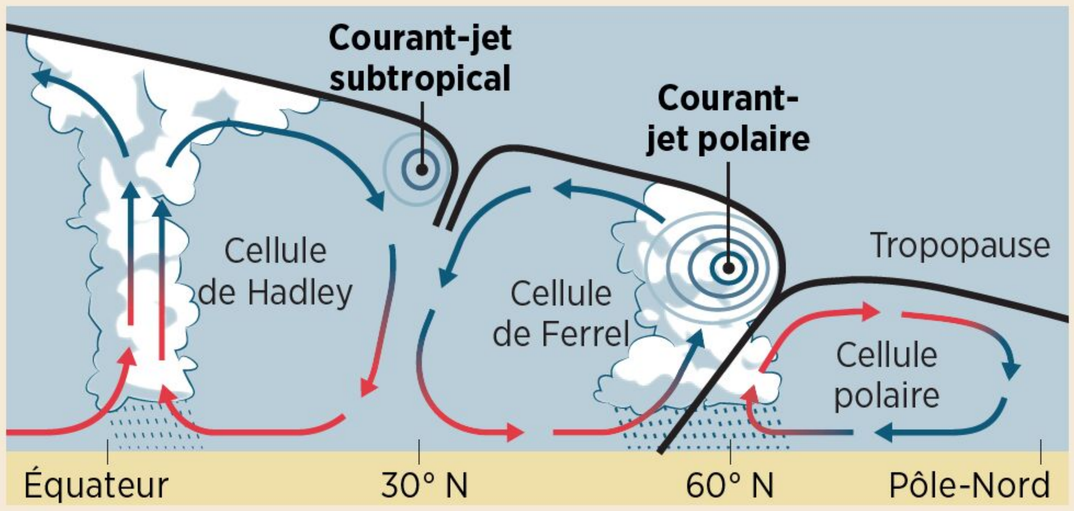
# Question d'équilibres

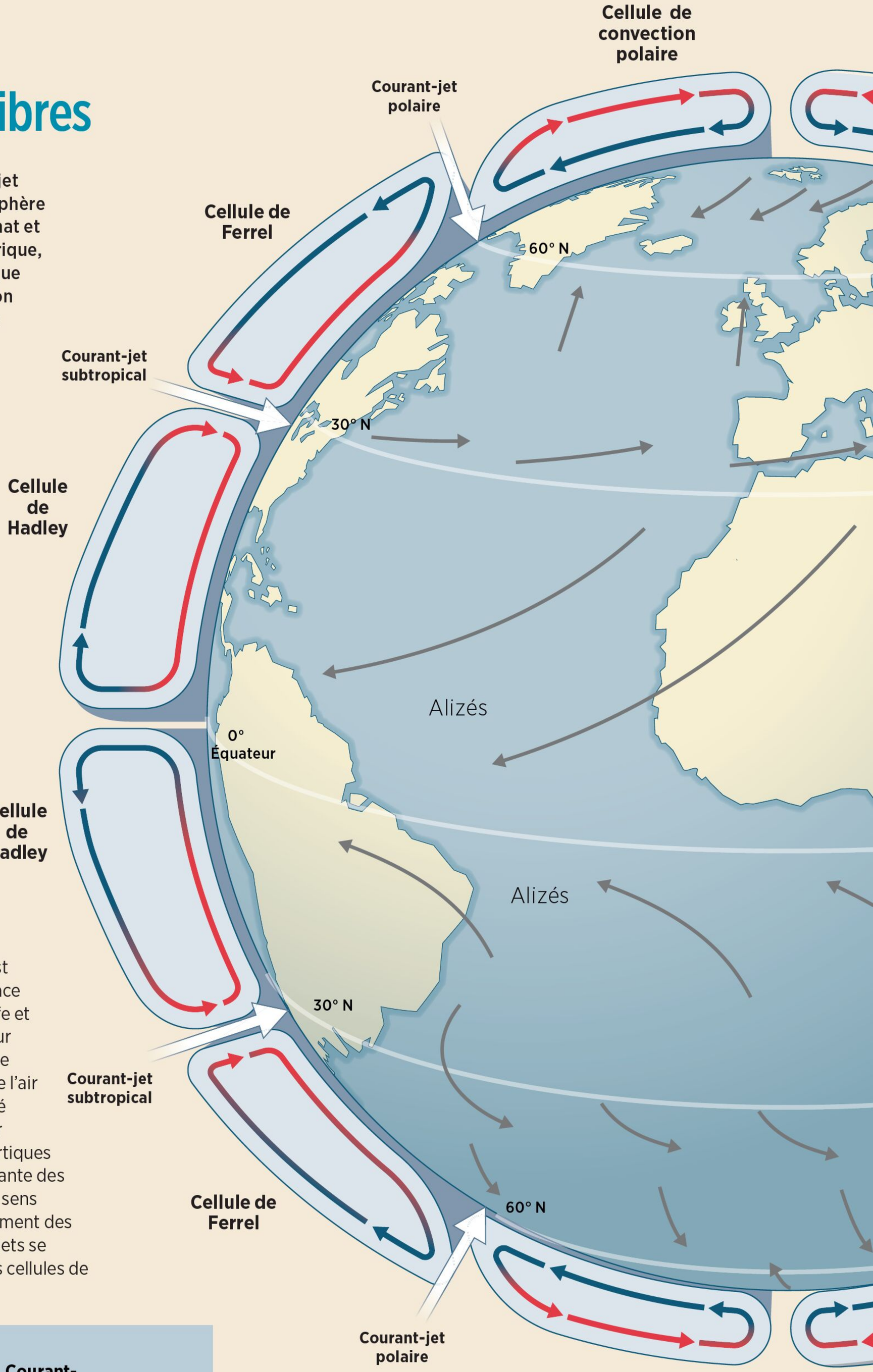
**À l'échelle de notre planète, de grands mouvements d'air, les courants-jets ou jet streams, situés aux confins de la troposphère et de la tropopause, déterminent le climat et la météo : c'est la circulation atmosphérique, qui permet – avec la circulation océanique *(lire p. 18-19)* – d'équilibrer la distribution d'énergie autour du globe. Ces grandes masses d'air résultent de la rotation de la Terre et des différences d'exposition au Soleil, donc de température, entre les pôles et l'équateur. Les courants-jets polaires et subtropicaux parcourent la Terre d'ouest en est.**

CELLULES DE CONVECTION

## MOUVEMENTS D'AIR EN CIRCUIT FERMÉ

Les températures entre l'équateur et les pôles tentent constamment de se rééquilibrer par des mouvements d'air. À l'échelle du globe se forment donc de grands mouvements circulatoires. Ils se divisent en grandes cellules de convection : des zones de l'atmosphère dans lesquelles l'air s'élève et descend en circuit fermé, tour à tour se réchauffant et se refroidissant. Il existe trois cellules de convection pour chaque hémisphère. La cellule polaire, aux hautes latitudes, est provoquée par une descente vers la surface terrestre d'air froid et sec, qui se réchauffe et remonte ensuite dans l'atmosphère autour de 50 ° de latitude. La cellule de Hadley se caractérise par la remontée en altitude de l'air chaud et humide de l'équateur. L'humidité est libérée par les précipitations, puis l'air asséché redescend vers les régions désertiques du globe. La cellule de Ferrel est la résultante des cellules polaire et de Hadley et tourne en sens inverse de celles-ci. Elle provoque notamment des vents d'ouest sur l'Europe. Les courants-jets se forment et circulent à la convergence des cellules de convection.

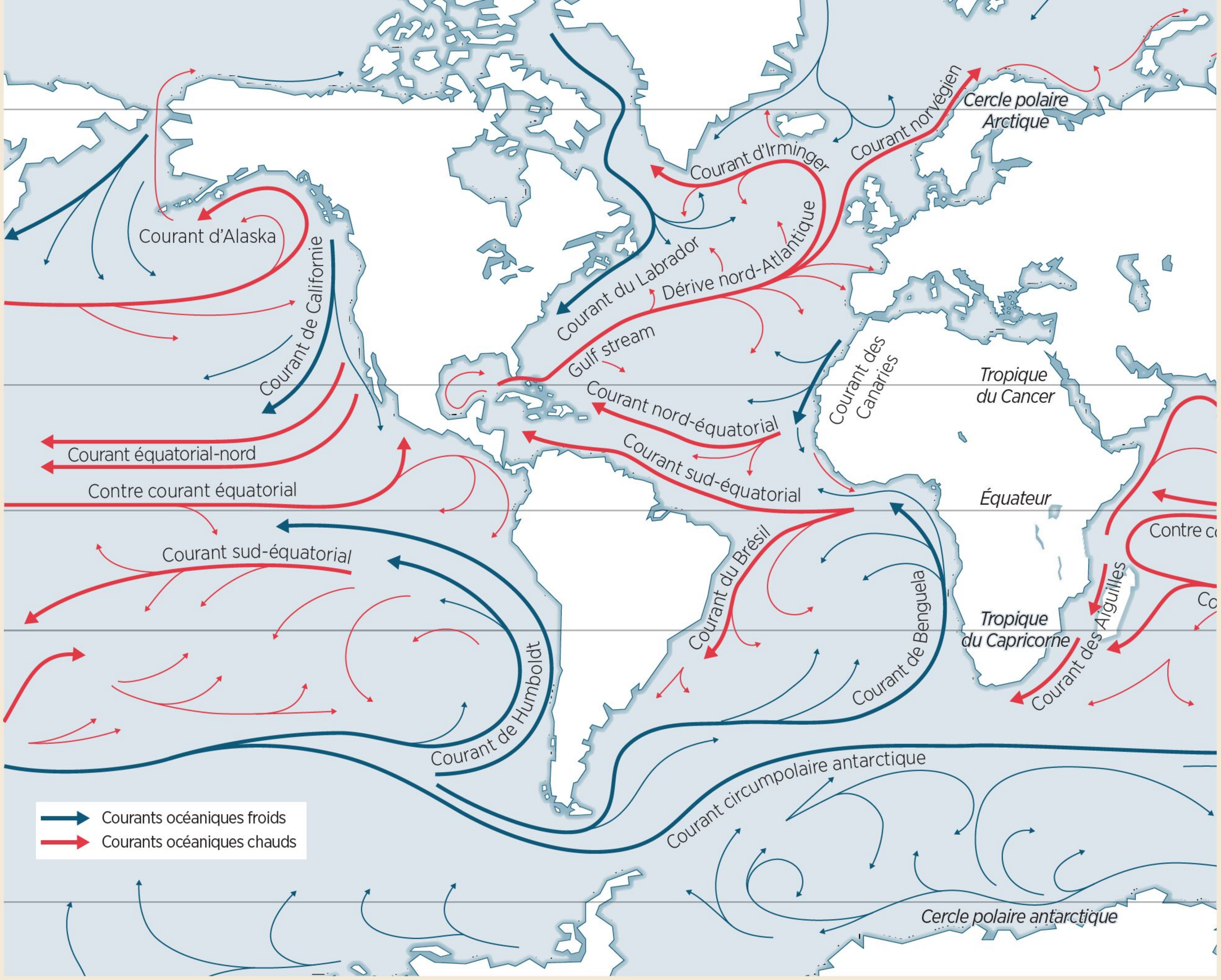



Pages réalisées par Jean-François Haït
Infographies : Philippe Puiseux

LES COURANTS OCÉANIQUES

*Les phénomènes globaux*



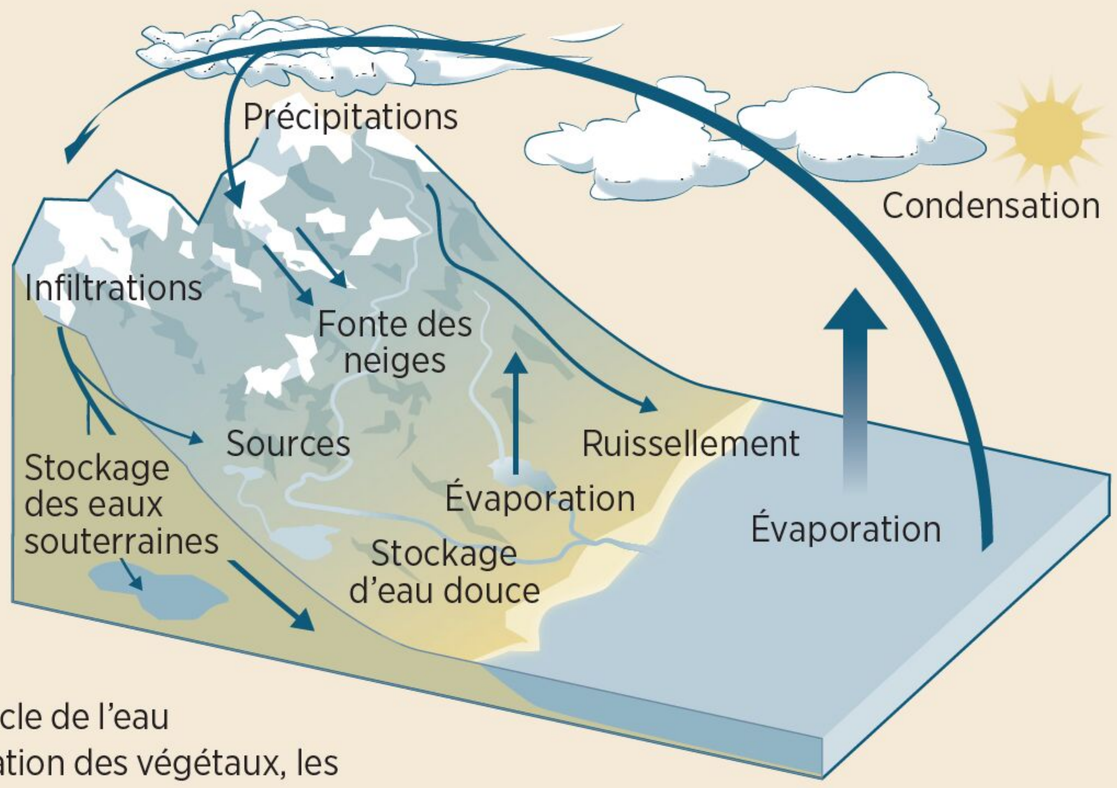

# Les océans, régulateurs du climat mondial

Les océans contiennent 97% de l'eau de notre planète. Ils absorbent, stockent et transfèrent de l'énergie solaire. En interaction avec l'atmosphère, ils sont à l'origine de nombreux phénomènes météorologiques. Et régulent le climat.

**CYCLE DE L'EAU**

## L'ATMOSPHÈRE, MACHINE À VAPEUR

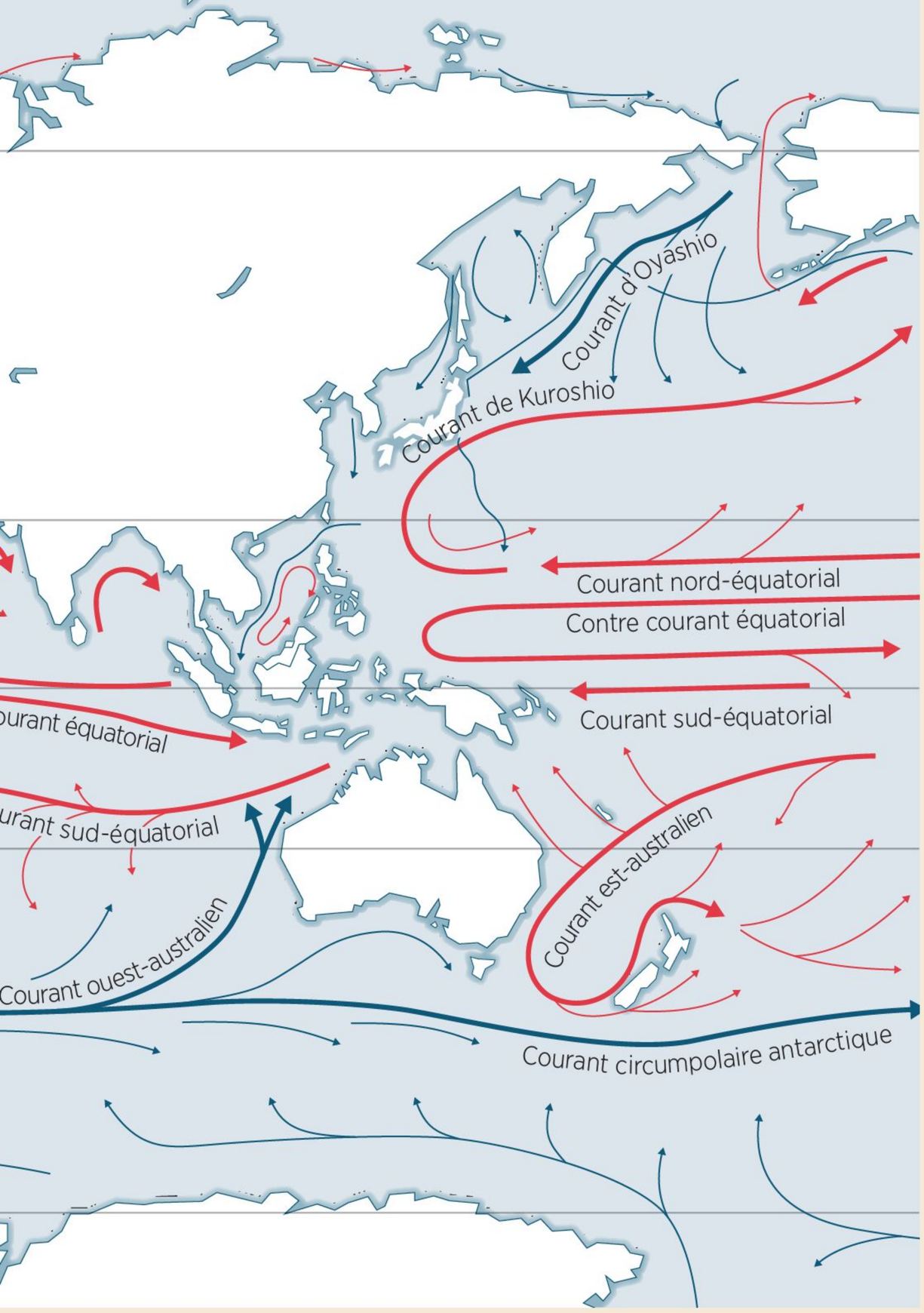
Chauffée par le soleil, l'eau, d'origine terrestre ou marine, s'élève sous forme de vapeur dans la troposphère. Son accumulation donne naissance aux nuages, poussés par les vents jusqu'à ce qu'ils rencontrent de l'air plus froid, qui fait se condenser les gouttelettes. Celles-ci forment alors de grosses gouttes qui, trop lourdes, tombent sous forme de  pluie ou de neige. En mer, ces précipitations obéissent à un cycle court et, en cas de vents violents, contribuent à la formation de tempêtes. Elles se présentent parfois comme des flux d'humidité intenses s'écoulant de façon quasi linéaire, notamment en hiver dans l'hémisphère nord et en été dans l'hémisphère sud, lorsque les cyclones extratropicaux sont fréquents. Ces « rivières atmosphériques » provoquent des pluies torrentielles. Le cycle de l'eau liquide continentale est, lui, plus complexe. Il inclut la respiration des végétaux, les écoulements de surface ou souterrains, et le stockage dans les glaciers et les lacs.



Pages réalisées par Caroline Depecker
Infographies : Philippe Puiseux

# Des courants soumis aux vents dominants

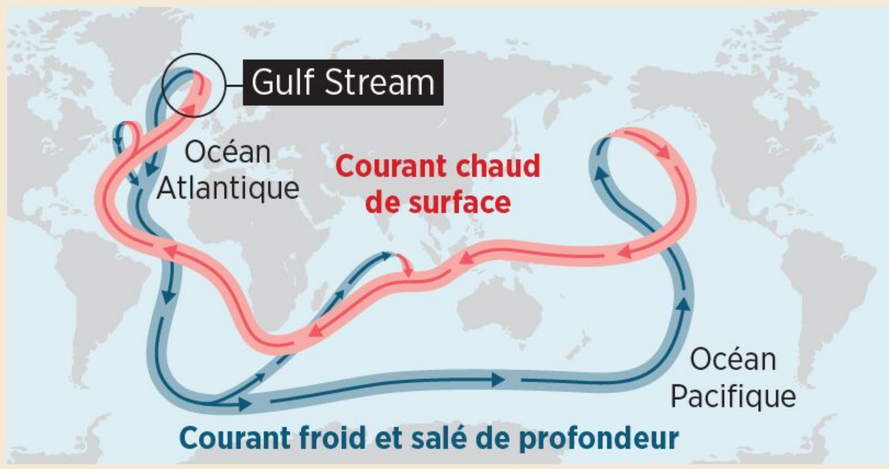
**Les courants océaniques entraînent d'énormes masses d'eau d'un point à l'autre de la Terre, affectant ainsi le climat des régions côtières. Grâce au rayonnement solaire, l'océan emmagasine de la chaleur dans les 300 premiers mètres de profondeur, avant tout dans les régions tropicales, mais plus généralement à toutes les latitudes où il n'est pas englacé. Les courants de surface, dépendants des vents et initiés par eux, sont extrêmement mobiles géographiquement. Sous l'action de la force de Coriolis, due à la rotation de la Terre, ils sont progressivement déviés de leur trajectoire initiale – d'est en ouest – et tournent dans le sens horaire dans l'hémisphère nord, antihoraire dans l'hémisphère sud. Ces courants de surface transportent la chaleur des tropiques vers les pôles (courants chauds) ou suivent le chemin inverse (courants froids).**

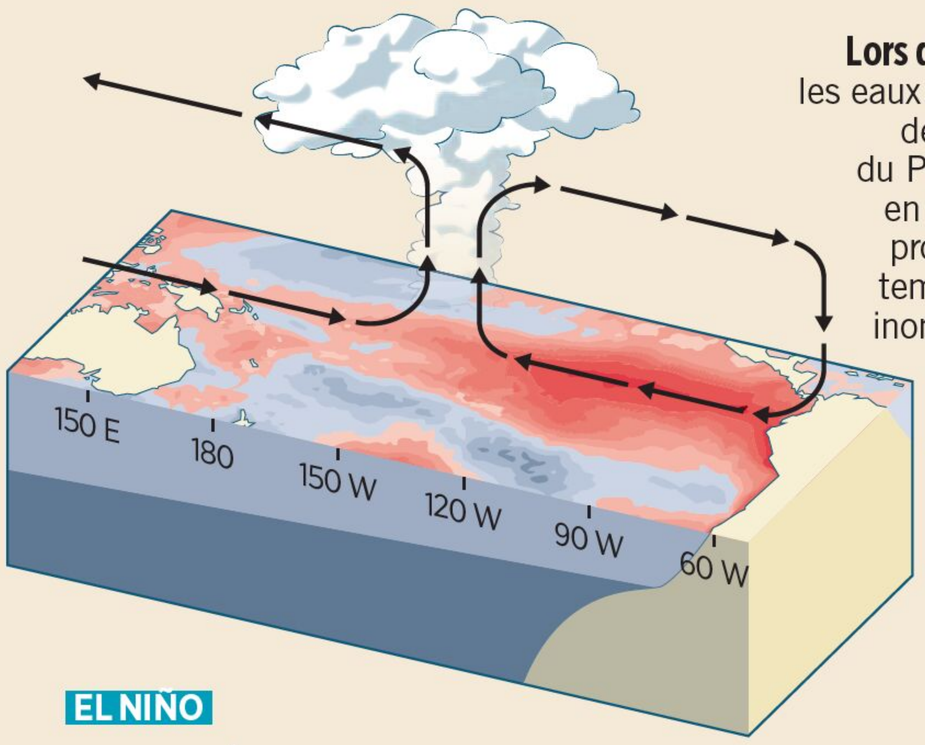



CIRCULATION THERMOHALINE

## LE TAPIS ROULANT OCÉANIQUE

Les courants océaniques dépendent aussi fortement des écarts de température et de salinité qui existent entre les masses d'eau. Plus une eau est salée et froide, plus elle est dense. Ces différences de densité déclenchent des transferts d'eau ascendants ou descendants qui contribuent à la circulation océanique profonde dite « thermohaline ». Pour illustration, le Gulf Stream est un courant chaud qui naît dans l'Atlantique nord de la fusion de trois courants de surface (les courants équatoriaux sud et nord, et le courant du golfe du Mexique). Après avoir longé la côte est des États-Unis, il bifurque vers l'est pour venir réchauffer les côtes de l'Europe occidentale. Progressant ensuite vers le nord, le Gulf Stream disparaît lorsque ses eaux se mélangent à celles de l'Arctique qui, plus froides et plus salées, s'enfoncent vers les abysses… et repartent vers le golfe du Mexique.




**Lors d'El Niño,** les eaux chaudes de surface du Pacifique, en refluant, provoquent tempêtes et inondations.

EL NIÑO

## ARRIVÉE D'AIR CHAUD !

Phénomène irrégulier culminant vers Noël (d'où son nom, référence à l'Enfant Jésus), El Niño correspond au réchauffement accentué des eaux de surface longeant la côte ouest de l'Amérique du Sud, normalement froides. En raison d'un affaiblissement des alizés (soufflant d'est en ouest) dû à une chute des pressions atmosphériques, les eaux chaudes du Pacifique sud refluent en effet d'ouest en est, emmenant avec elles les nuages et précipitations caractérisant l'air chaud ascendant. El Niño s'accompagne de sécheresses marquées en Australie et en Asie, et d'inondations en Amérique latine, Afrique équatoriale et au sud des États-Unis. Les tempêtes tropicales et les cyclones se déplacent aussi plus à l'est, affectant la Polynésie. Lorsque les alizés se renforcent dans le Pacifique sud, le phénomène inverse s'observe : la Niña (la petite fille), aux effets opposés, mais moins prononcés.

### ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT ?

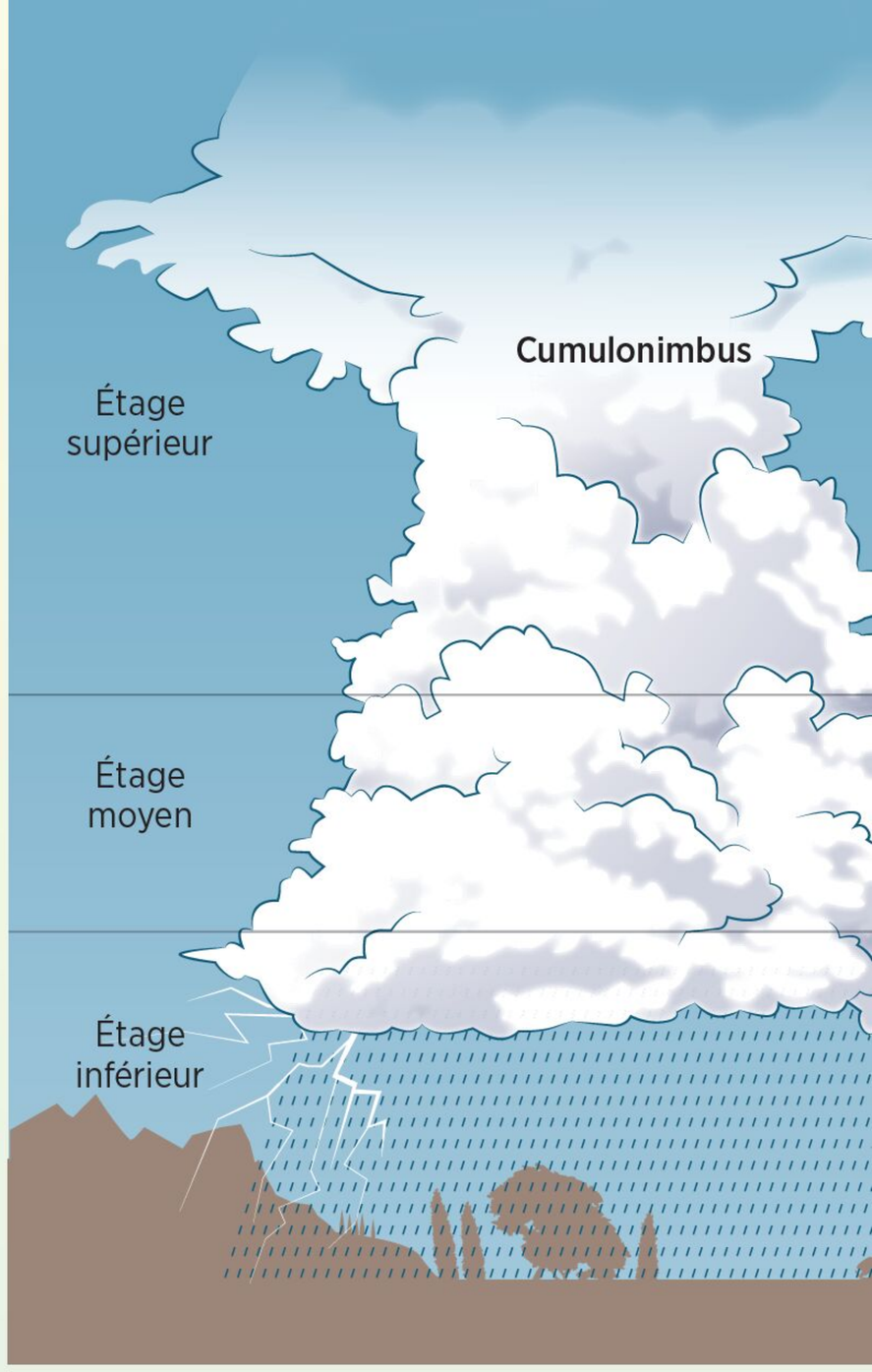
**Absorbant plus de 90% de la chaleur excédentaire du système climatique, l'océan s'est réchauffé depuis 1970 de 0,11°C par décennie en moyenne sur les 75 premiers mètres. En août 2023, la température océanique moyenne a atteint le niveau record de 21,1°C. Ce réchauffement continuera aussi bien en surface qu'en profondeur. Avec, à la clé, une redistribution des précipitations à l'échelle mondiale, une augmentation de la fréquence des canicules marines, des épisodes intenses de type El Niño, et de l'intensité des tempêtes et des cyclones. Le Gulf Stream pourrait ralentir, en raison cette fois-ci de la fonte des glaces de l'Arctique et du Groenland.**

# Au cœur des nuées

La formation des nuages est loin d'avoir livré tous ses secrets à la science. Leur étude à l'échelle microscopique dévoile un monde de chimie et de biologie qu'on commence seulement à explorer.

## DES AÉROSOLS POUR CONSTITUER LE NOYAU DUR DES NÉBULOSITÉS

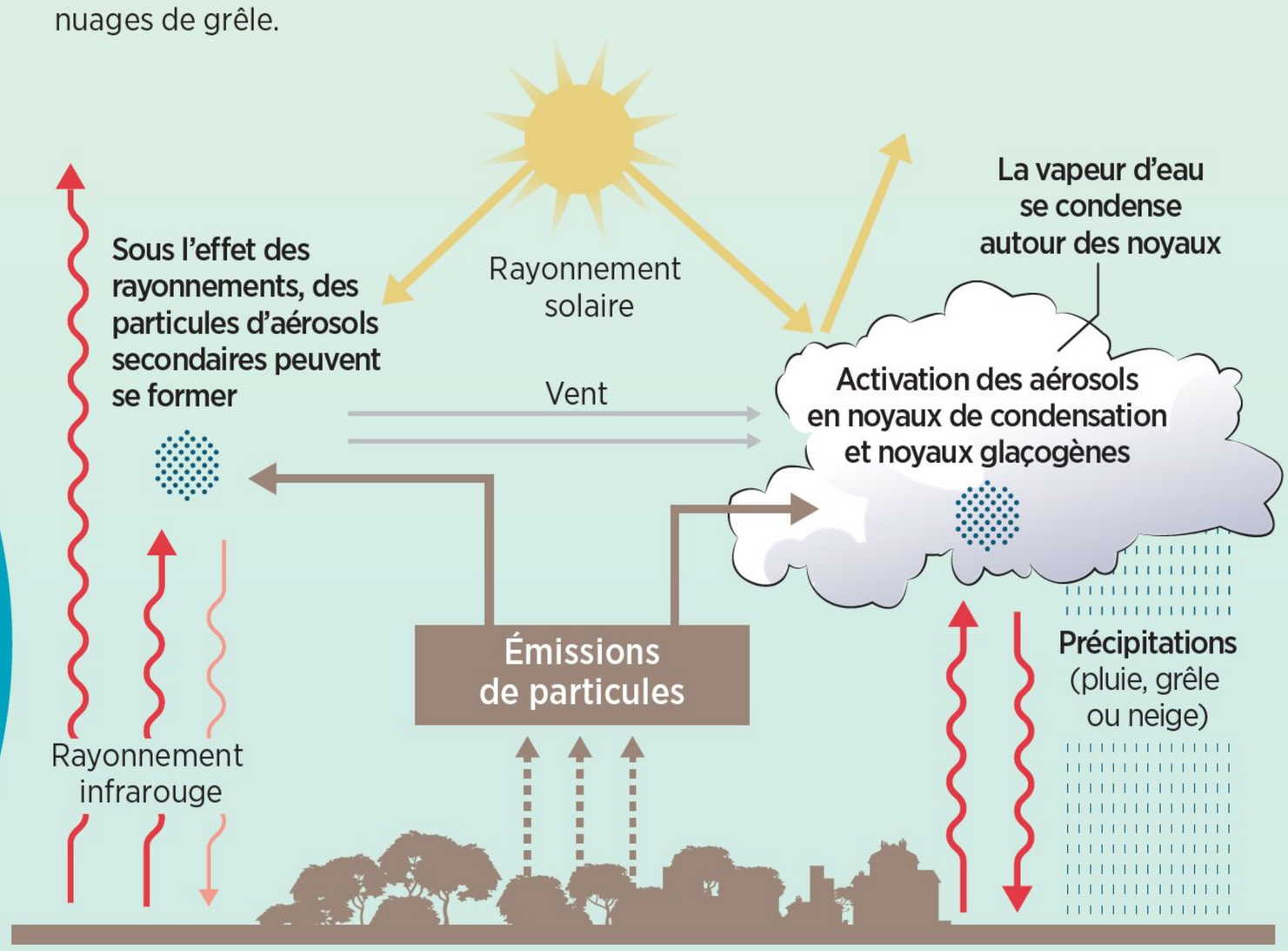
À l'école, on enseigne que les nuages se forment lors des mouvements de masses d'air. Leur naissance est avant tout une histoire de condensation, c'est-à-dire de transformation de vapeur d'eau en gouttelettes liquides en suspension dans l'air. Désormais, la recherche regarde aussi ces processus à l'échelle microscopique. Car pour générer la condensation et créer les gouttelettes, il faut un support. Les scientifiques les nomment particules d'aérosols. La taille et la nature de ces aérosols varient. Le plus souvent d'origine naturelle, comme les sels de mer ou des composés organiques émis par la végétation, ils peuvent même être vivants comme des bactéries, des microalgues, des pollens… Ils sont aussi produits par l'activité humaine, comme les poussières émises par les usines ou les feux de cheminée, particules issues de la circulation automobile. Lorsque les aérosols proviennent du sol, ils sont dits primaires. Créés directement dans l'air, par oxydation sous l'effet des rayonnements solaire et infrarouge, ils sont qualifiés de secondaires.
En fonction de la composition chimique des aérosols, un nuage peut avoir différentes propriétés. Les nuages riches en aérosols issus de la pollution sont par exemple particulièrement brillants. Car ces particules forment des gouttelettes plus nombreuses et petites que les particules naturelles. La réflexion de la lumière y est plus forte. Les sels de mer, eux, facilitent la production de pluie. Et les poussières de combustion semblent plus fréquentes dans les nuages de grêle.




Pour étudier ces phénomènes, les météorologues disposent d'un aspirateur à nuages, ou collecteur d'eaux atmosphériques : un dispositif de recherche unique au monde installé au sommet du puy de Dôme (1465 m). L'appareil capte les nuages de la troposphère libre, une partie de l'atmosphère qui permet le transport de masses d'air sur de grandes distances, au-dessus de la couche d'air qui reçoit les émissions locales, provenant de la surface. On y trouve les traces de composés provenant de l'autre bout du globe, par exemple les mégafeux ayant ravagé les forêts du Canada l'été dernier.

### ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT?

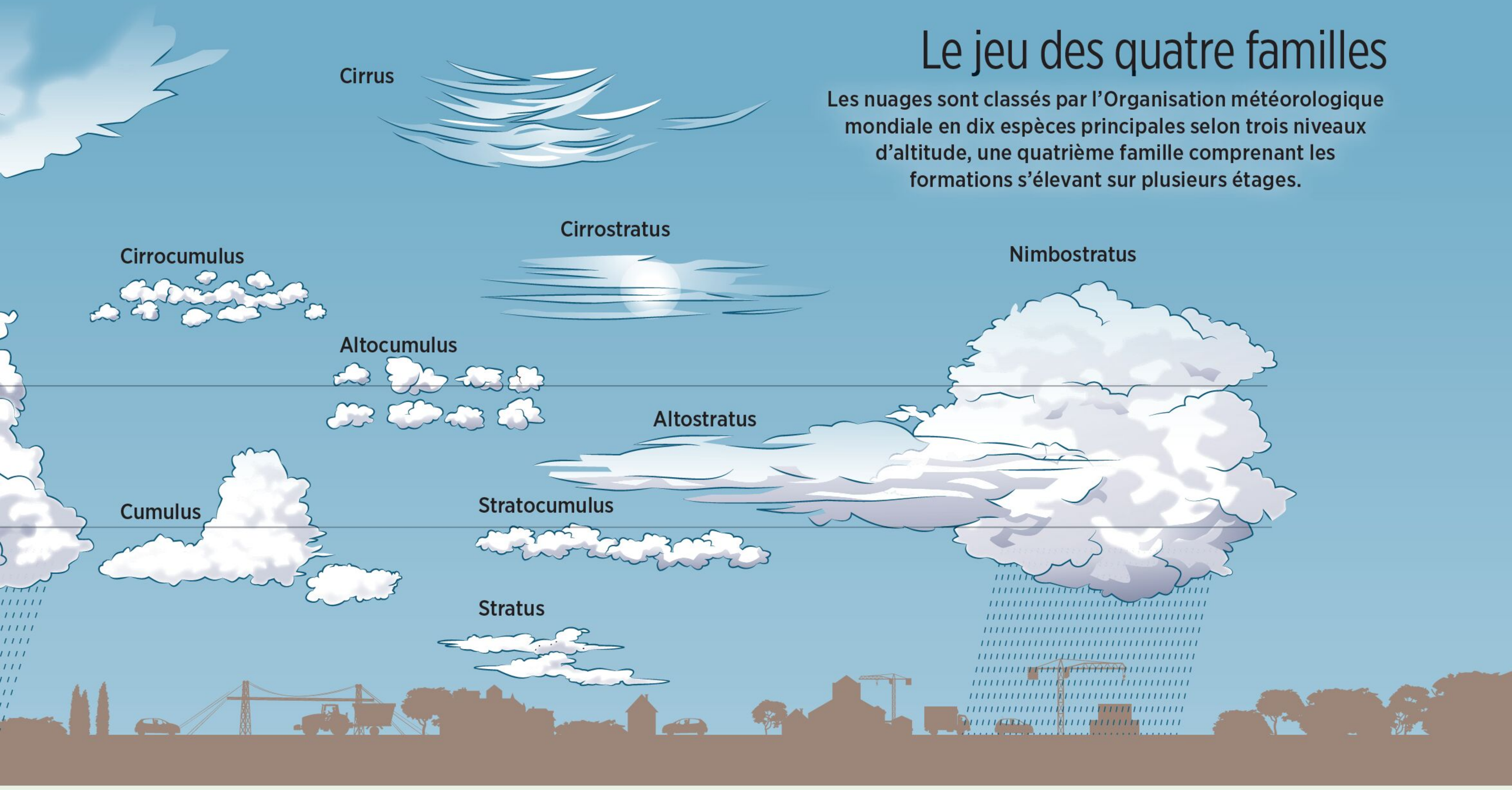
« *Les nuages ont un effet ambivalent sur le climat,* précise Laurent Deguillaume, du Laboratoire de météorologie physique à Aubière (Puy-de Dôme). *En bloquant la radiation solaire, ils abaissent la température terrestre. Mais ils retiennent aussi les rayons infrarouges – chauds – émis par le sol.* » Comprendre leur effet global est un défi pour la recherche. Même les modèles climatiques les plus puissants s'y perdent. Ceux utilisés par le Giec ont une résolution de plusieurs kilomètres, bien trop grande pour simuler correctement les nuages. Les géants blancs restent de grands inconnus du changement climatique.




Pages réalisées par Agnès Vernet  Infographies : Philippe Puiseux

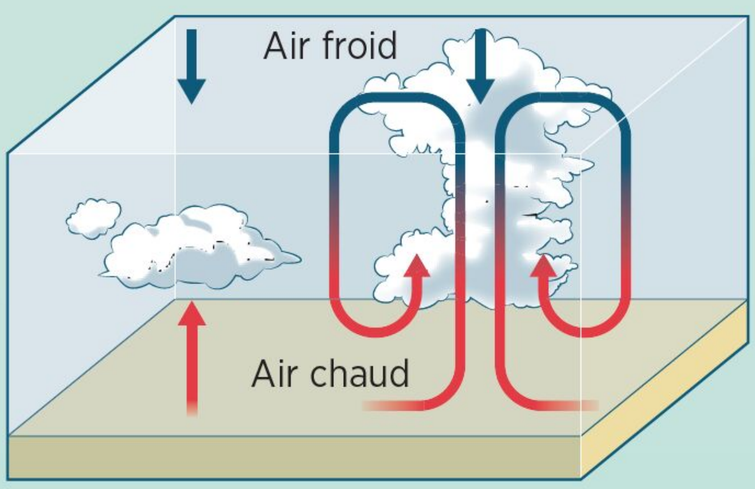
# Le jeu des quatre familles

**Les nuages sont classés par l'Organisation météorologique mondiale en dix espèces principales selon trois niveaux d'altitude, une quatrième famille comprenant les formations s'élevant sur plusieurs étages.**



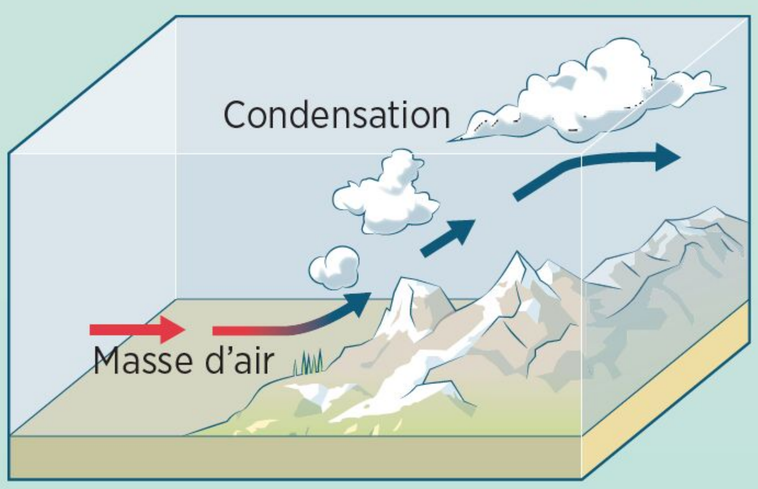

## PLUSIEURS RAISONS D'ÊTRE UN NUAGE

### Par convection



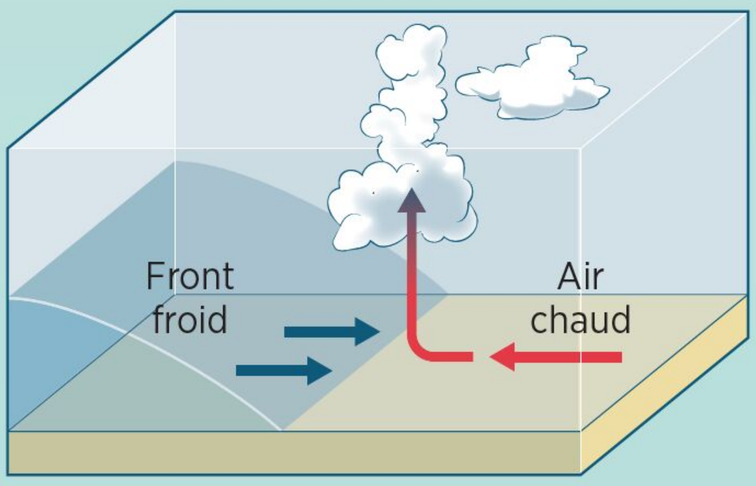

Les nuages se forment par **convection** lorsqu'une masse d'air chaud et humide se refroidit en prenant de l'altitude. Le phénomène est fréquent en été sur terre et en hiver au-dessus des mers.

### Par soulèvement orographique



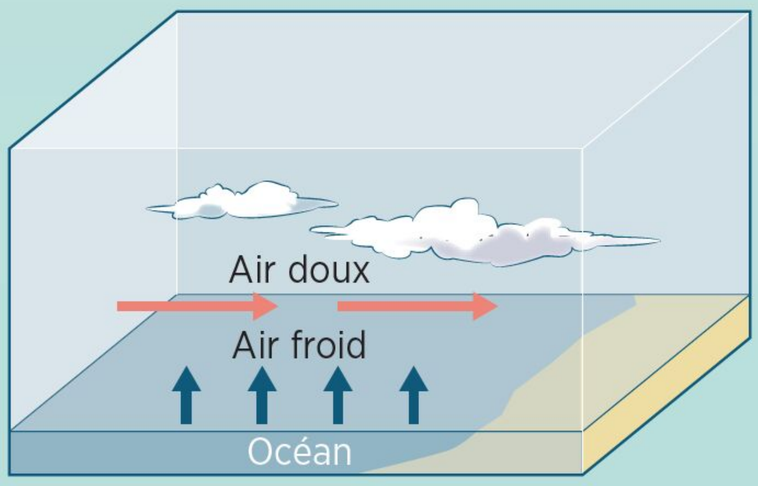

Lorsqu'un flux d'air, poussé par le vent, se heurte à un relief, on observe un **soulèvement orographique** : la masse d'air est contrainte de s'élever, sa température s'abaisse… et le nuage se forme.

### Par soulèvement frontal




À l'interface entre masses d'air de différentes températures, dans une perturbation en mouvement, l'air chaud passe au-dessus de l'air froid. En altitude, sa température chute. Ce **soulèvement frontal** génère des nuages.

### Par refroidissement par la base



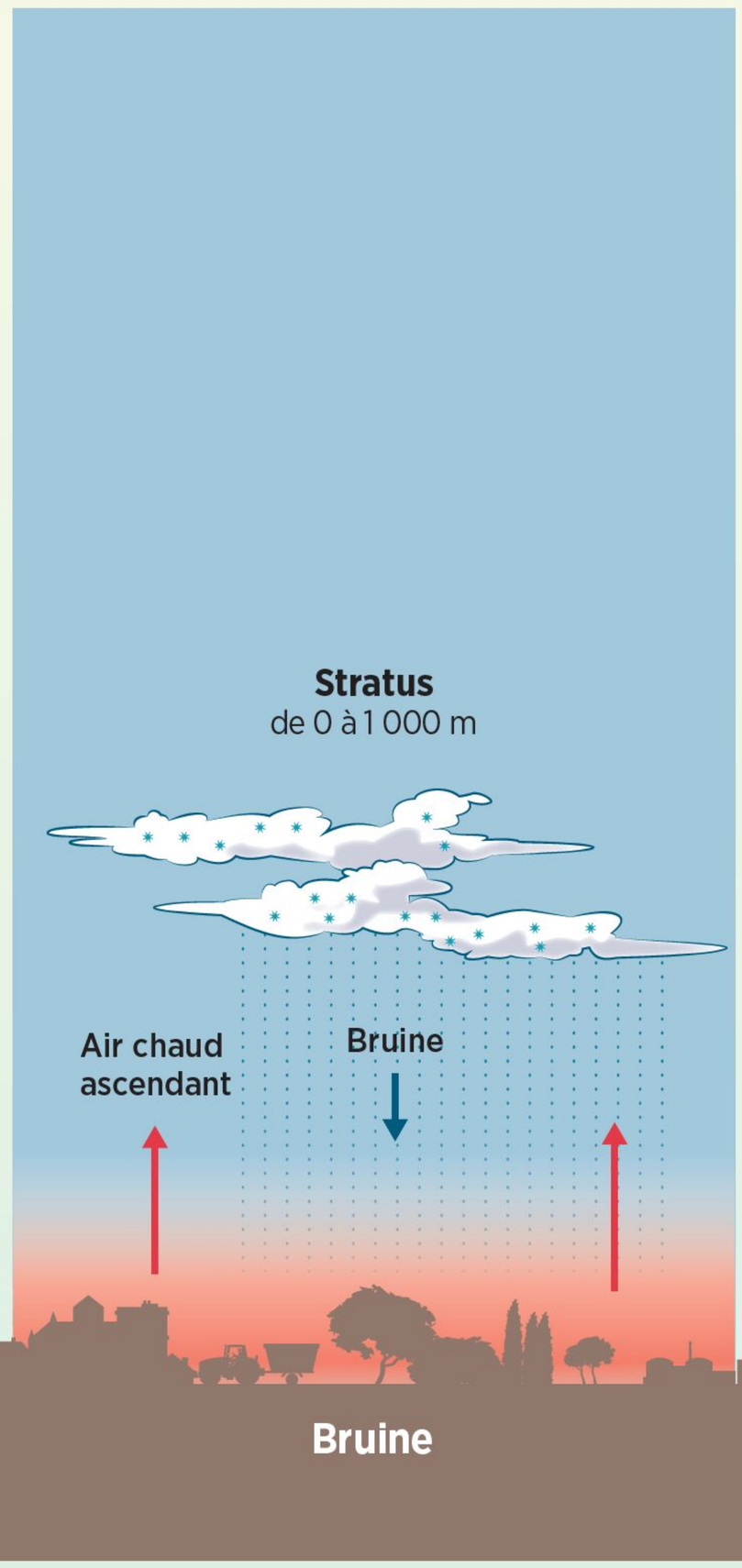

Lorsqu'une masse d'air doux circule au-dessus d'une surface plus froide, comme la mer, elle peut subir un **refroidissement par la base**. Cela produit des nuages bas ou du brouillard.

## PLUIE À VOLONTÉ ?

Avec la maîtrise des mécanismes moléculaires impliqués dans la condensation des nuages revient un ancien rêve : savoir faire tomber la pluie. L'ensemencement des nuages consiste à envoyer dans l'atmosphère un produit, iodure d'argent, sels de sodium ou cristaux de glace, afin qu'il constitue des noyaux de condensation. On peut ainsi « récolter » l'humidité d'une masse d'air, faire pleuvoir chez soi plutôt que chez son voisin… Le tout avec une efficacité toute relative : d'après un rapport de l'OMM, 0 à 20 % selon les conditions et les techniques. Le procédé n'est soumis à aucune réglementation. En France, certains vignobles l'emploient afin de réduire les dégâts liés à la grêle. Reste que la toxicité des produits envoyés dans l'atmosphère doit être surveillée… L'iodure d'argent est par exemple soupçonné d'affecter les écosystèmes terrestres et aquatiques.

# À toutes vapeurs !

Brouillard, pluie ou neige ? Le destin de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère ne dépend pas que de la température de l'air. Gravitation, advection, surfusion… autant de phénomènes physiques qui ont leur rôle à jouer. Sans compter les turbulences !




## L'IMPORTANT, C'EST LA ROSÉE

**Pendant une nuit sans nuage, la chaleur du sol se diffuse dans les couches basses de l'atmosphère, plus froides. L'eau se condense alors en gouttelettes qui se déposent sur la végétation et les sols. C'est la rosée. La température à partir de laquelle ce phénomène survient, appelée point de rosée, dépend de la température de l'air mais aussi de son taux d'humidité. Si la température du sol est inférieure à 0°C, l'eau des gouttes de rosée, surfondue – liquide bien que de température inférieure à 0 – va geler instantanément au contact du sol, formant du givre. La température du point de rosée est à 12° si la température de l'air est à 12° avec un taux d'humidité de 100 %, mais à 23°C avec 50 % d'humidité.**

## ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT?

**Lorsque la température s'élève, l'évaporation augmente et davantage d'humidité peut être stockée dans l'air. Il s'en suit des pluies plus soutenues par endroits, des épisodes extrêmes plus nombreux, comme une augmentation des zones de sécheresse. L'eau des pluies ruisselant sur des sols secs ne parvient pas à s'infiltrer dans le sol. Les rivières débordent. Entre 1982 et 2014, 72,5% des communes françaises ont connu ce phénomène d'inondation par ruissellement.**

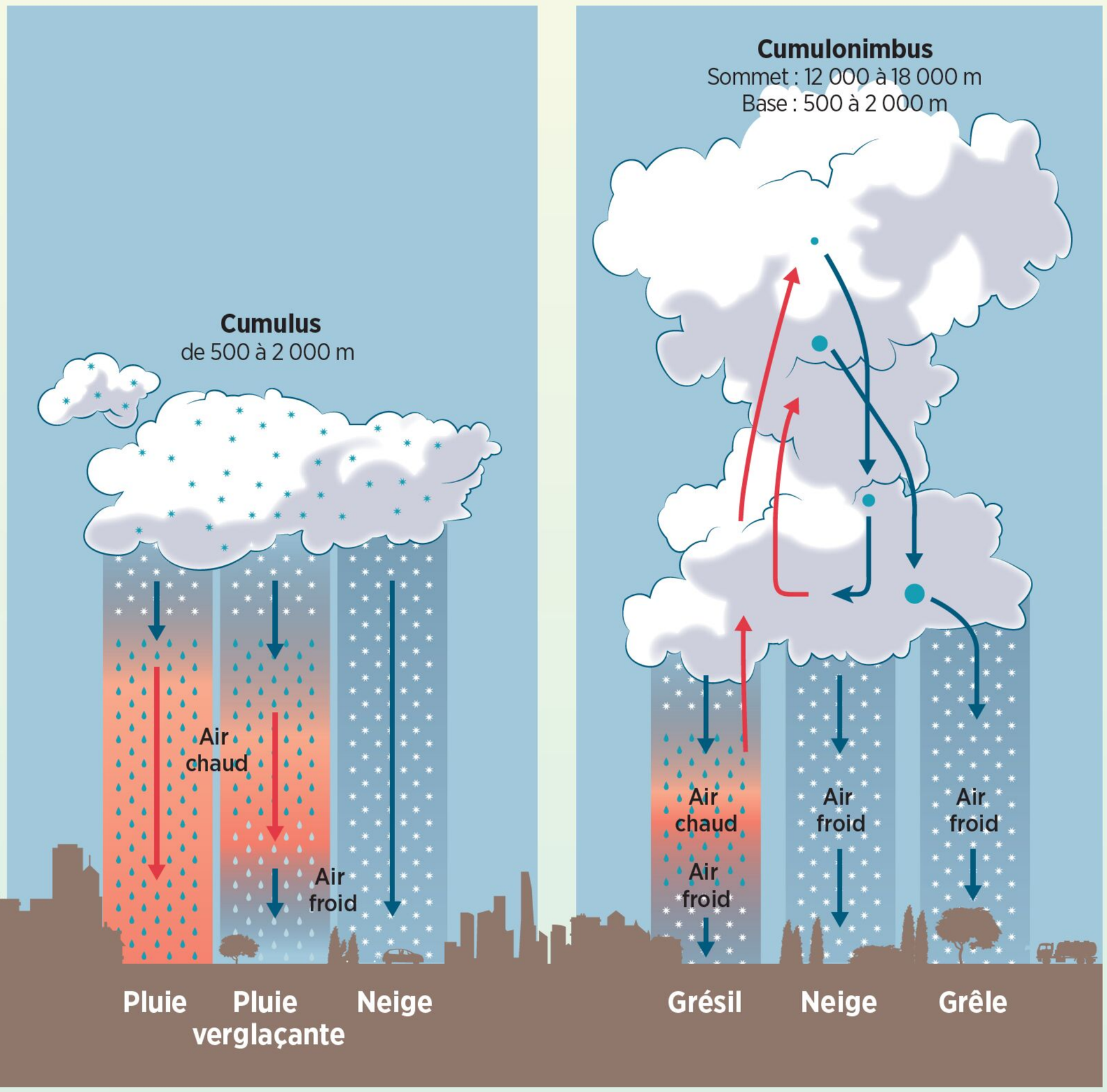
**BROUILLARD** Par nuit claire et calme, le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère. En fin de nuit, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense au niveau du sol et forme un brouillard dit de rayonnement. Il est dit d'advection quand, en journée, une masse d'air chaud et humide se déplace sur un sol froid. La visibilité y est inférieure à 1 kilomètre. On parle de brume si elle est comprise entre 1 et 5 kilomètres, sauf en mer où l'on parle de brume pour une visibilité inférieure à 0,5 mile (920 mètres). Quand les gouttelettes sont formées d'eau surfondue (liquide avec une température négative), elles gèlent instantanément au contact de la chaussée, de la végétation ou des fils électriques. Le brouillard devient givrant.

**PLUIE** En s'évaporant, la vapeur d'eau se condense et forme des gouttes liquides. Dans les nuages bas que sont les stratus, les gouttes de moins de 0,5 mm tombent en bruine. Dans les cumulus, les gouttes peuvent geler et tomber sous leur propre poids. Au contact de l'air plus chaud, elles fondent en pluie, parfois fine et continue, parfois intermittente et violente lors des averses, suivant le type de nuage qui la génère et la vitesse du vent. On la mesure en hauteur recueillie sur une surface d'un mètre carré pendant un temps donné.

## UNE GOUTTE N'EN VAUT PAS UNE AUTRE

| Intensité (mm/h) | | Diamètre des gouttes (mm) |
|---|---|---|
| <2 | Faible | **0,45** |
| 2-6 | Modérée | **1** |
| 6-10 | Forte | **1,5** |
| >10 | Averse | **2-3** |
| >30 | Orage | **3-5** |

**La pluie se caractérise** par son intensité et le diamètre des gouttes.




## RECORDS

PLUIE

**1 825 mm**
**en 24 heures**
à Foc-Foc, sur l'île de la Réunion, les 7 et 8 janvier 1966.

**31,2 mm**
en une minute à Unionville (Maryland, Etats-Unis) le 4 juillet 1956.

GRÊLE/GRÊLONS

**1,02 kg**
à Gopalganj (Bengladesh) le 19 avril 1986.

**20,3 cm**
de diamètre à Vivian (Dakota du Sud, Etats-Unis) le 23 juillet 2010 (vitesse de chute estimée à 65 km/h).

NEIGE

**1,94 m**
**en 48 heures**
(État de New York) les 11 et 12 janvier 1997.

Au dessus de 500 m, **38 m** dans les alpes japonaises sur un an.

Plus gros flocon :
**38 cm x 12 cm**
à Fort Keogh (Montana, États-Unis). en janvier 1887.

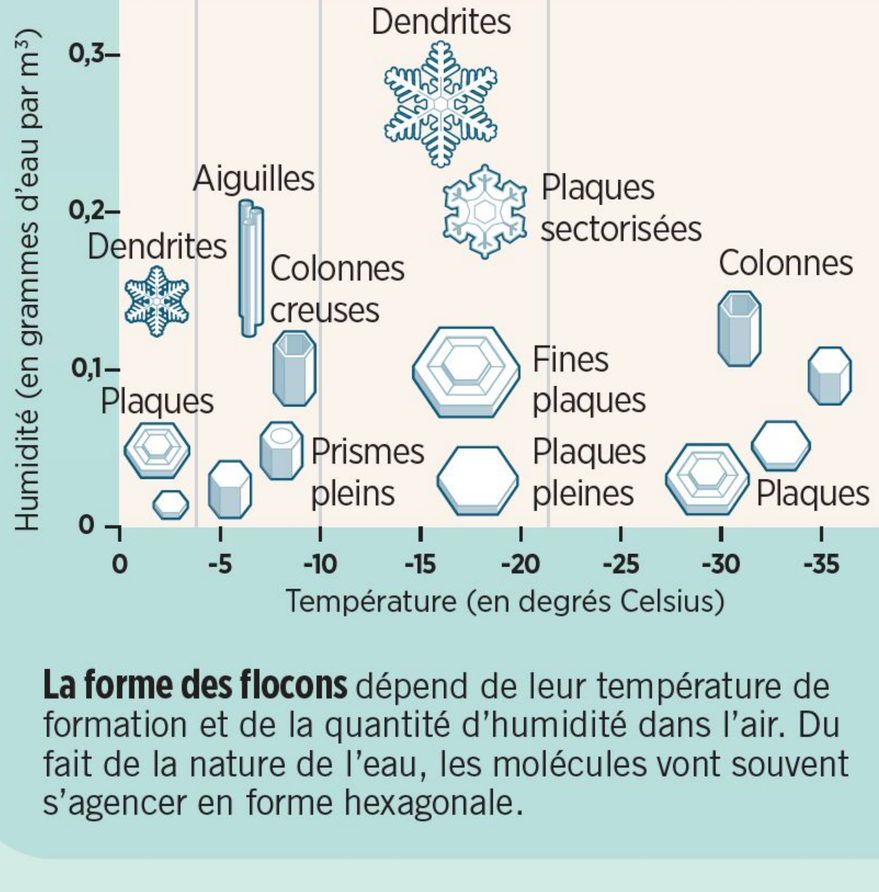
Pages réalisées par
Jacques-Olivier Baruch
Infographies : Philippe Puiseux

**GRÉSIL** Comme pour la pluie, les cristaux de glace en suspension dans les cumulus tombent sous leur propre poids, puis fondent en pluie en traversant un air plus doux. Mais si la température de la couche d'air la plus basse est négative, les gouttelettes gèlent à nouveau en petits grains sphériques de 1 à 3 millimètres de diamètre et tombent sous cette forme de grésil.

**GRÊLE** Dans les cumulonimbus, l'eau se condense en gouttelettes ou en cristaux de glace suivant la température. Elle n'est pas inerte, car ces nuages sont le siège d'importantes turbulences. Les violents courants ascendants et descendants font s'agréger les gouttes d'eau surfondue autour des cristaux et former une couche translucide. Les grêlons montent et descendent au gré de la turbulence, grossissant au gré des agglomérations. Quand leur poids parvient à contrer les effets ascendants de la turbulence, les grêlons chutent vers le sol d'autant plus vite qu'ils sont lourds et viennent donc de très haut. Ils peuvent être meurtriers comme à Moradabad (Inde) le 20 avril 1888, où 246 personnes sont décédées.

**NEIGE** Dans les cumulus et les cumulonimbus, la température de l'air est inférieure à 0°C, l'eau gèle autour de noyaux de condensation que sont les poussières ou les grains de sable présents dans les nuages. Les cristaux de glace grossissent et s'agglutinent en flocons. Si, lorsqu'ils tombent à terre, la température de l'eau reste inférieure à 0°C, les flocons descendent jusqu'au sol. La forme des flocons dépend de la température de formation et de l'humidité présente dans l'air.

### LES FLOCONS : UN BESTIAIRE INCROYABLE




**La forme des flocons** dépend de leur température de formation et de la quantité d'humidité dans l'air. Du fait de la nature de l'eau, les molécules vont souvent s'agencer en forme hexagonale.

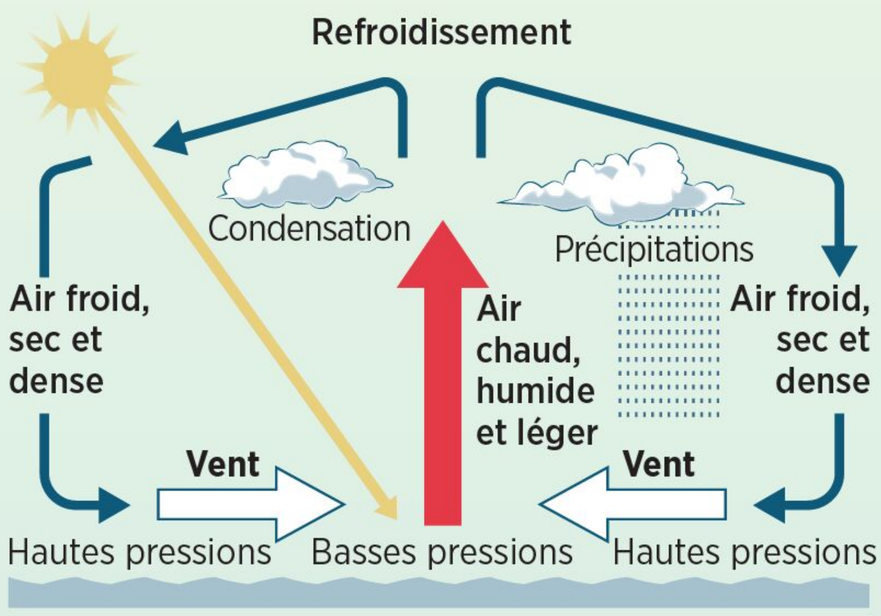
# Entre hautes et basses pressions, des appels d'air !

De la brise légère au plus puissant des ouragans, le vent naît de différences de température et de pression. Mais il est aussi régi par des contraintes terrestres.

## D'OÙ VIENT LE VENT ?

Le vent est généré lorsque des masses d'air sont propulsées par différentes forces, dont :
• La pression atmosphérique, qui les pousse des zones de haute pression vers les zones de basse pression pour tenter de rétablir l'équilibre.
• La force de Coriolis, due à la rotation de la Terre sur son axe, qui dévie la trajectoire du vent vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.
• Et les frottements, qui modifient l'intensité du vent et sa direction en fonction de la morphologie du sol ou des obstacles tels que des montagnes.
Ensemble, ces forces poussent le vent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans les basses pressions et dans le sens des aiguilles d'une montre dans les hautes pressions dans l'hémisphère nord, alors que c'est l'inverse dans l'hémisphère sud. C'est la règle de Buys-Ballot.

**Les zones de hautes pressions** contiennent un plus grand volume d'air sur un espace donné. Pour tenter de rééquilibrer le volume d'air de surface, des courants d'air se mettent en place.




## L'ÉCHELLE DE BEAUFORT

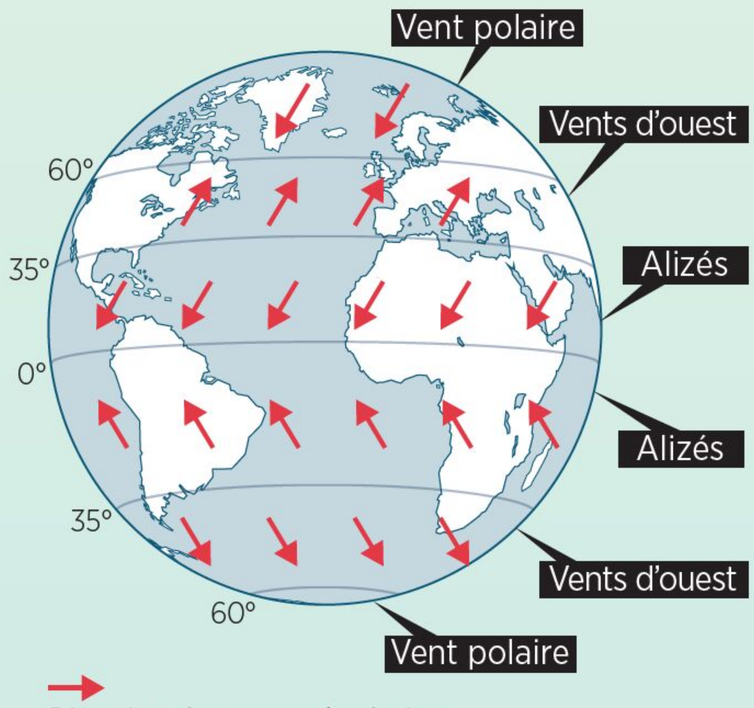
| Description | Vitesse | Effet |
|---|---|---|
| Calme | < 1 | La fumée se lève verticalement |
| Très légère brise | 1 à 5 | Fumées déviées |
| Légère brise | 6 à 11 | Frémissement des feuilles |
| Petite brise | 12 à 19 | Le vent déploie les drapeaux |
| Jolie brise | 20 à 27 | Le vent soulève la poussière |
| Bonne brise | 28 à 38 | Les arbustes se balancent |
| Vent frais | 39 à 49 | Utilisation des parapluies difficile |
| Grand frais | 50 à 61 | Marche contre le vent pénible |
| Coup de vent | 62 à 74 | Branches cassées |
| Fort coup de vent | 75 à 88 | Cheminées et tuiles arrachées |
| Tempête | 89 à 102 | Arbres déracinés |
| Violente tempête | 103 à 120 | Gros ravages |
| Ouragan | > 120 | Dévastation |

Inventée en 1805, l'échelle de Beaufort décrit l'intensité du vent en km/h. Elle comporte 13 degrés, de 0 (calme) à 12 (ouragan).

## ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT ?

L'effet futur du réchauffement climatique sur le vent est incertain. Il pourrait entraîner un ralentissement global des flux d'air, à cause d'un réchauffement plus rapide aux pôles que dans le reste de la planète. Les différences de température entre le froid polaire et la chaleur tropicale pourraient donc diminuer, atténuant l'écart de pressions atmosphériques, principal moteur des vents. Mais plusieurs études récentes montrent qu'au contraire, les vents sont globalement en train d'accélérer depuis quelques décennies, notamment les courants d'altitude (à plus de 7 kilomètres d'altitude) ainsi que les vents très forts liés à des phénomènes extrêmes tels que les cyclones, surtout près des pôles.

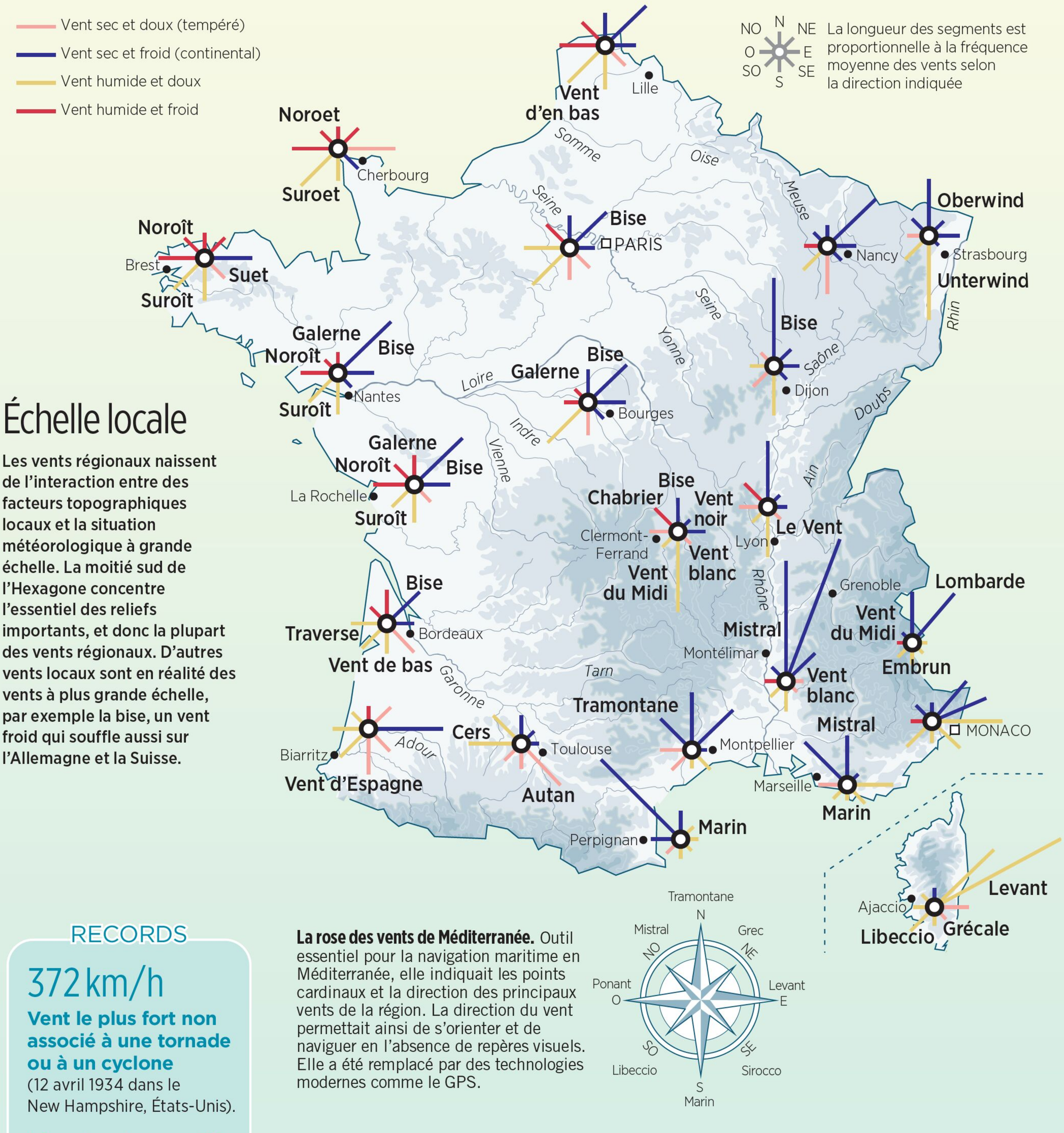
## ENTRE ÉQUATEUR ET PÔLES, TROIS ZONES DE CIRCULATION



Direction des vents planétaires

• **Les vents polaires** se déplacent des zones de hautes pressions polaires (à des latitudes supérieures à 66°) vers les régions de basses pressions subpolaires, du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère sud.
• **Les vents d'ouest** soufflent à des latitudes comprises entre 35 et 60°. Ils se déplacent du sud-ouest au nord-est dans l'hémisphère nord et du nord-ouest au sud-est dans l'hémisphère sud.
• **Les alizés** sont des vents intenses et réguliers qui soufflent depuis les régions tropicales, avec de hautes pressions permanentes, vers l'équateur, où se trouvent des basses pressions permanentes. Ils ont été essentiels pour le commerce maritime, au point que les Anglais les appellent *trade winds* (vents de commerce).

Pages réalisées par Nicolas Gutierrez C.
Infographies : Philippe Puiseux




# Échelle locale

**Les vents régionaux naissent de l'interaction entre des facteurs topographiques locaux et la situation météorologique à grande échelle. La moitié sud de l'Hexagone concentre l'essentiel des reliefs importants, et donc la plupart des vents régionaux. D'autres vents locaux sont en réalité des vents à plus grande échelle, par exemple la bise, un vent froid qui souffle aussi sur l'Allemagne et la Suisse.**




**La rose des vents de Méditerranée.** Outil essentiel pour la navigation maritime en Méditerranée, elle indiquait les points cardinaux et la direction des principaux vents de la région. La direction du vent permettait ainsi de s'orienter et de naviguer en l'absence de repères visuels. Elle a été remplacé par des technologies modernes comme le GPS.

## RECORDS

**372 km/h**

**Vent le plus fort non associé à une tornade ou à un cyclone**
(12 avril 1934 dans le New Hampshire, États-Unis).

**Lieu le plus venté**

**Baie du Commonwealth en Antarctique (vents atteignant 322 km/h).**

**486 km/h**

**Vent le plus fort dans une tornade**
(3-5 mai 1999 en Oklahoma, États-Unis).

## LE VENT, LES RAFALES ET LE GRAIN

• L'intensité et la direction du vent sont très variables. Les météorologues mesurent le **vent instantané** (sur une période de 3 secondes) et le **vent moyen** (calculé sur une période de 10 minutes).
• Une **rafale** est une augmentation brusque du vent au-delà des variations normales dans un endroit donné (lorsque l'intensité du vent instantané dépasse le vent moyen de plus de 18 km/h).
• Un **grain** est une variation plus forte et plus longue que la rafale, avec une augmentation de la vitesse du vent d'au moins 28 km/h par rapport à la vitesse moyenne, pendant au moins une minute, avec un net changement de direction. Cet événement météorologique est redouté par les marins, car il est souvent accompagné d'averses ou d'orages.

# Et, soudain, le temps tourne à l'orage…

En matière de météo, chaud et froid font rarement bon ménage. Les perturbations atmosphériques naissent au contact de masses d'air opposées, entraînant, selon l'échelle spatiale, la formation de vastes tempêtes ou d'orages très localisés.

## LES TEMPÊTES, DE VIOLENTES COLLISIONS D'AIR

Les tempêtes des moyennes latitudes (entre 30 et 60°) – appelées aussi cyclones extratropicaux – naissent de la collision de masses d'air chaudes et humides venant des régions tropicales avec celles, froides et sèches, situées (dans l'hémisphère nord) au-dessus de l'Atlantique. Se créent alors des fronts pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres carrés. Ils s'étirent à mesure que l'altitude augmente, dessinant une ligne courbe. Leur confrontation entraîne une baisse de pression au sol : les vents s'intensifient, les nuages et les précipitations se développent. Plus l'écart de température, de densité et d'humidité entre les masses d'air est important, plus les vents sont violents. Ceux-ci s'intensifient encore en rencontrant le courant-jet, entre 8 et 12 kilomètres d'altitude. La tempête se calme lorsque l'énergie cinétique mobilisée pour former les fronts se dissipe par frottement. Une tempête est définie dès lors que les vents dépassent 90 km/h. Les plus intenses se situent autour de 60° de latitude, où le contraste thermique est maximal entre les masses d'air polaires et subtropicales.

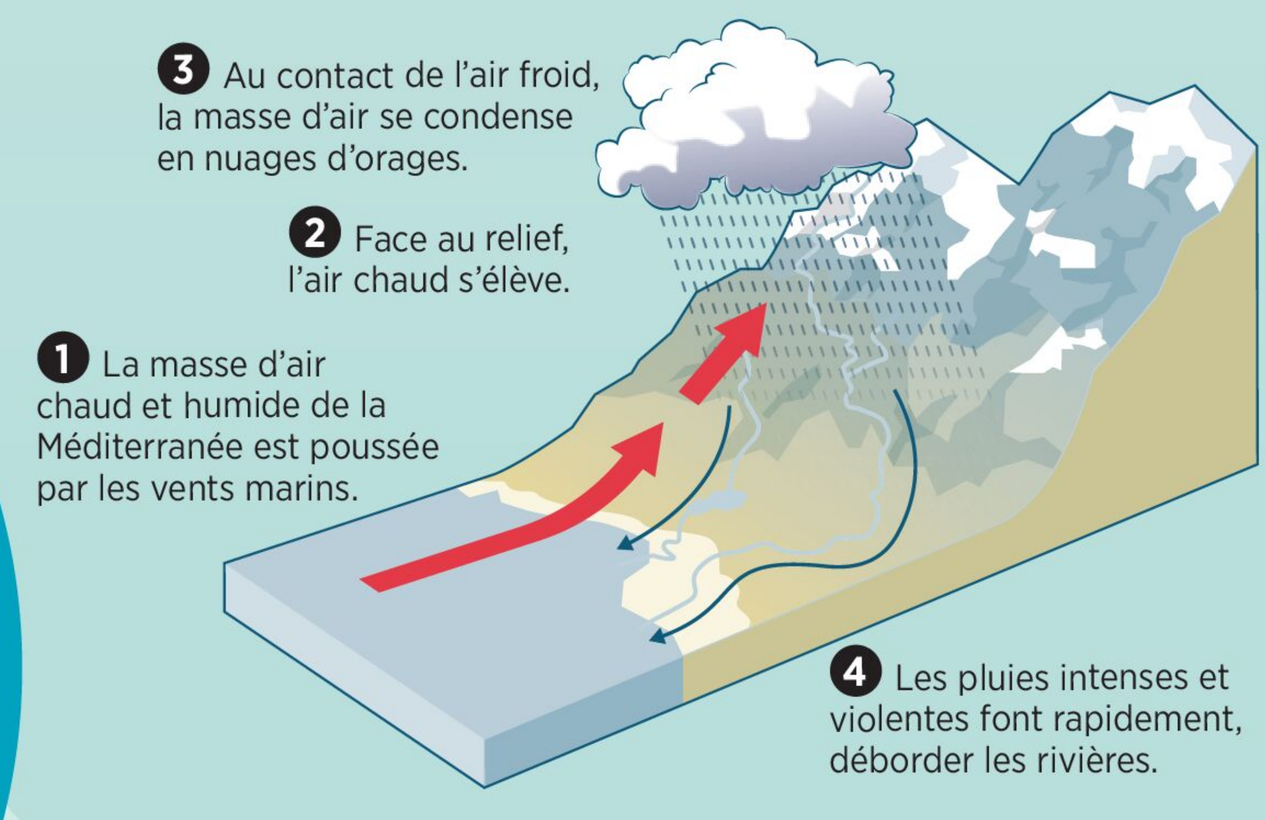
### LA BOMBE MÉTÉO

**Il s'agit d'une tempête qui s'intensifie très rapidement du fait d'une chute brutale de pression (au moins 24 hectopascals en 24 heures). À l'origine d'épisodes telles les tempêtes Xynthia (2010) ou Ciaran (2023), ces dépressions « explosives » sont observées dans les régions tempérées.**

Pages réalisées par
Riva Brinet-Spiesser
Infographies : Philippe Puiseux

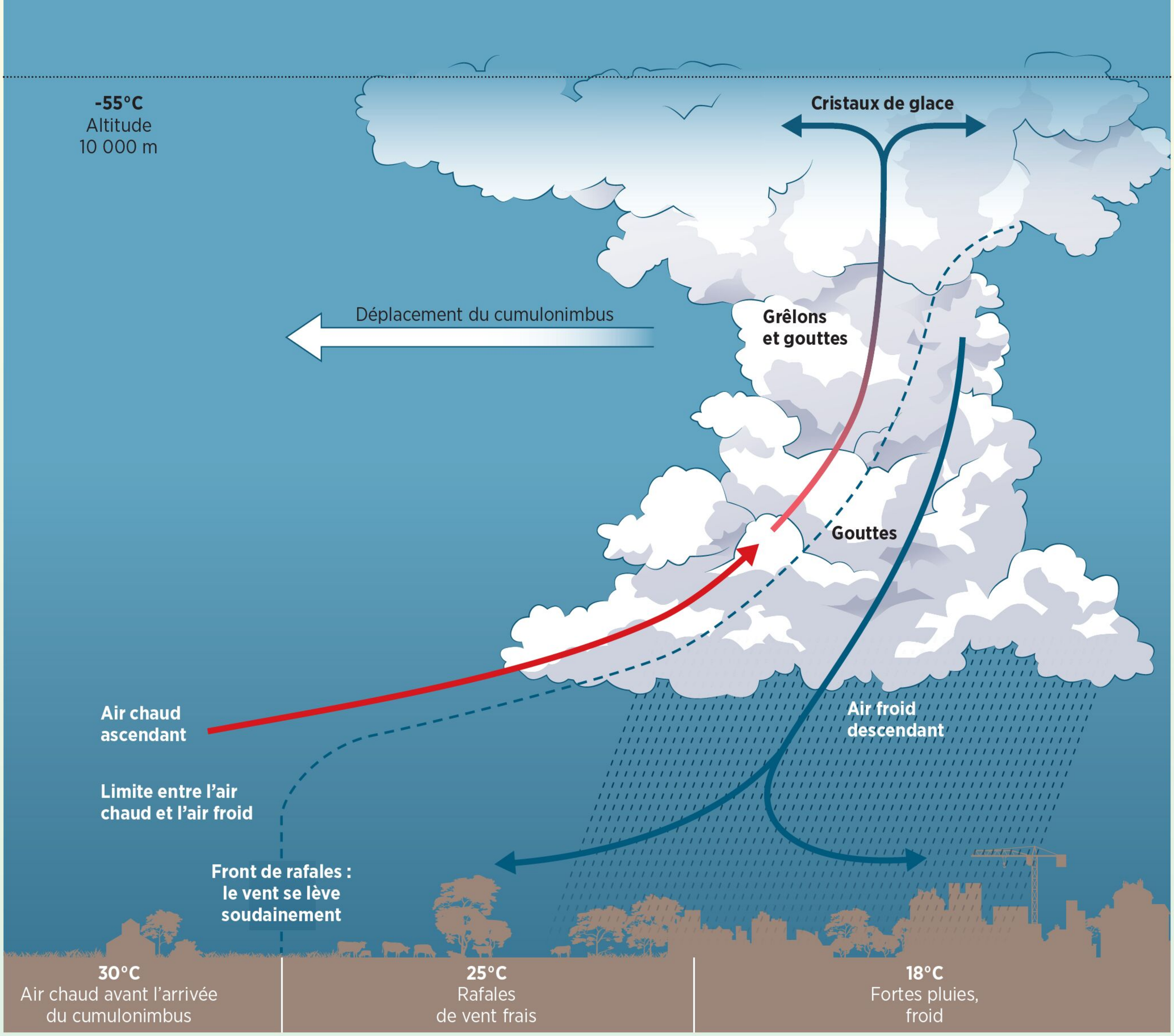
## UN DÉLUGE: L'ÉPISODE CÉVENOL

Ce sont des orages violents accompagnés de pluies torrentielles – plus de 200 millimètres de précipitations en 24 heures –, entraînant le plus souvent des crues soudaines (épisodes de Vaison-la-Romaine en 1992 ou de la Vésubie en 2020). On ne les observe pas exclusivement dans les Cévennes mais, plus largement, sur l'arc méditerranéen. Ils se produisent lorsque de l'air chaud et humide généré par les températures élevées de la Méditerranée en fin d'été rencontrent les reliefs montagneux, entraînant un soulèvement des masses d'air et une condensation responsable des fortes pluies. L'air froid en altitude, bloqué par les reliefs, agit comme un couvercle, renforçant la violence du phénomène. Ces épisodes s'observent fréquemment entre septembre et décembre.




## ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT?

**L'augmentation de la fréquence des orages n'est pas établie, car ce sont des phénomènes complexes de petite taille (autour de 2 kilomètres de diamètre), difficiles à modéliser. L'intensité des précipitations devrait par contre augmenter.**
**Quant aux tempêtes, compte tenu des nombreux facteurs qui entrent en jeu dans leur formation, il n'y a pas aujourd'hui de consensus scientifique sur l'augmentation de leur intensité ni de leur fréquence dans un climat plus chaud. Le Giec estime que l'Europe pourrait être confrontée à des tempêtes sinon plus fréquentes, au moins plus intenses (degré de confiance faible à moyen).**



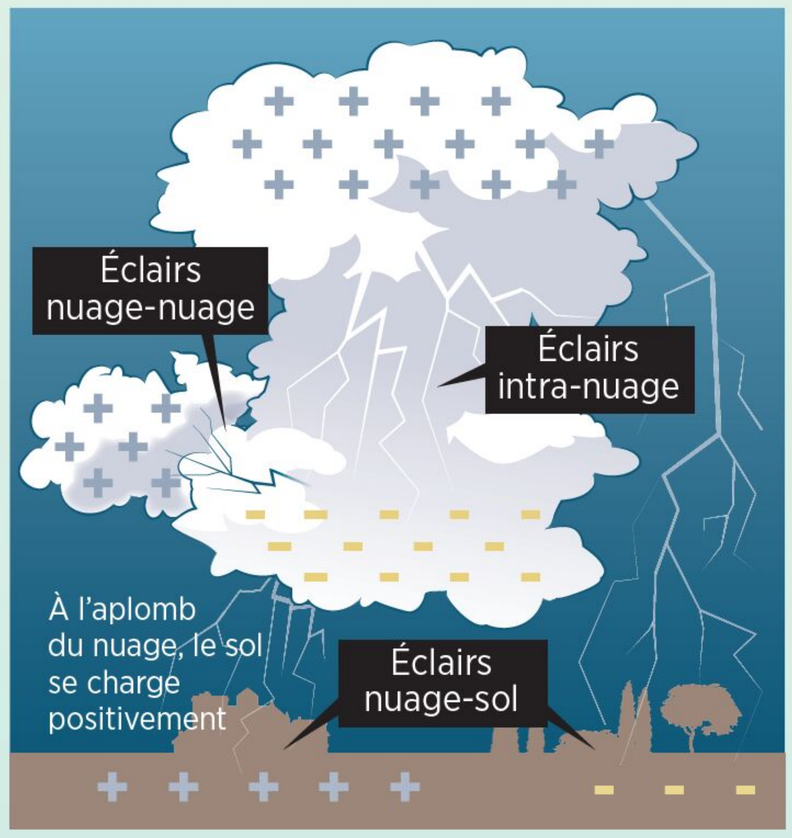

# Comment se forme un orage

**Les orages sont des phénomènes localisés et de courte durée s'accompagnant d'événements violents : averses de pluie ou de grêle, vents, tonnerre et éclairs. Pour qu'un orage se forme, l'atmosphère doit être humide et instable, avec un fort contraste de températures entre l'air chaud près du sol et l'air froid en altitude. L'ascension de masses d'air chaud est le facteur déclenchant la formation de nuages orageux, ou cumulonimbus. Elle se produit dans différentes conditions : en présence d'un relief montagneux par exemple (soulèvement orographique), quand le sol surchauffé provoque l'ascension d'une bulle d'air chaud et donc plus léger que l'air environnant (soulèvement thermique), ou lorsque l'air chaud rencontre, en s'élevant, une masse d'air froid (soulèvement frontal). Le cumulonimbus gonfle alors, pouvant atteindre plus de 15 kilomètres de hauteur. Lorsque les particules de glace qui se développent à son sommet deviennent assez grosses, elles provoquent des précipitations et un courant descendant d'air frais. Celui-ci, une fois au sol, interrompt l'apport d'air chaud vers le sommet du nuage, qui s'affaiblit et se dissipe. L'orage ne dure pas plus de deux heures.**

### L'ORAGE SEC

Cet événement rare se produit lorsque la pluie s'évapore à haute altitude avant d'avoir touché le sol. Il est accentué par la sécheresse. La foudre s'abat alors sur un sol en déficit hydrique, engendrant des risques d'incendie.

## DES CHARGES EXPLOSIVES



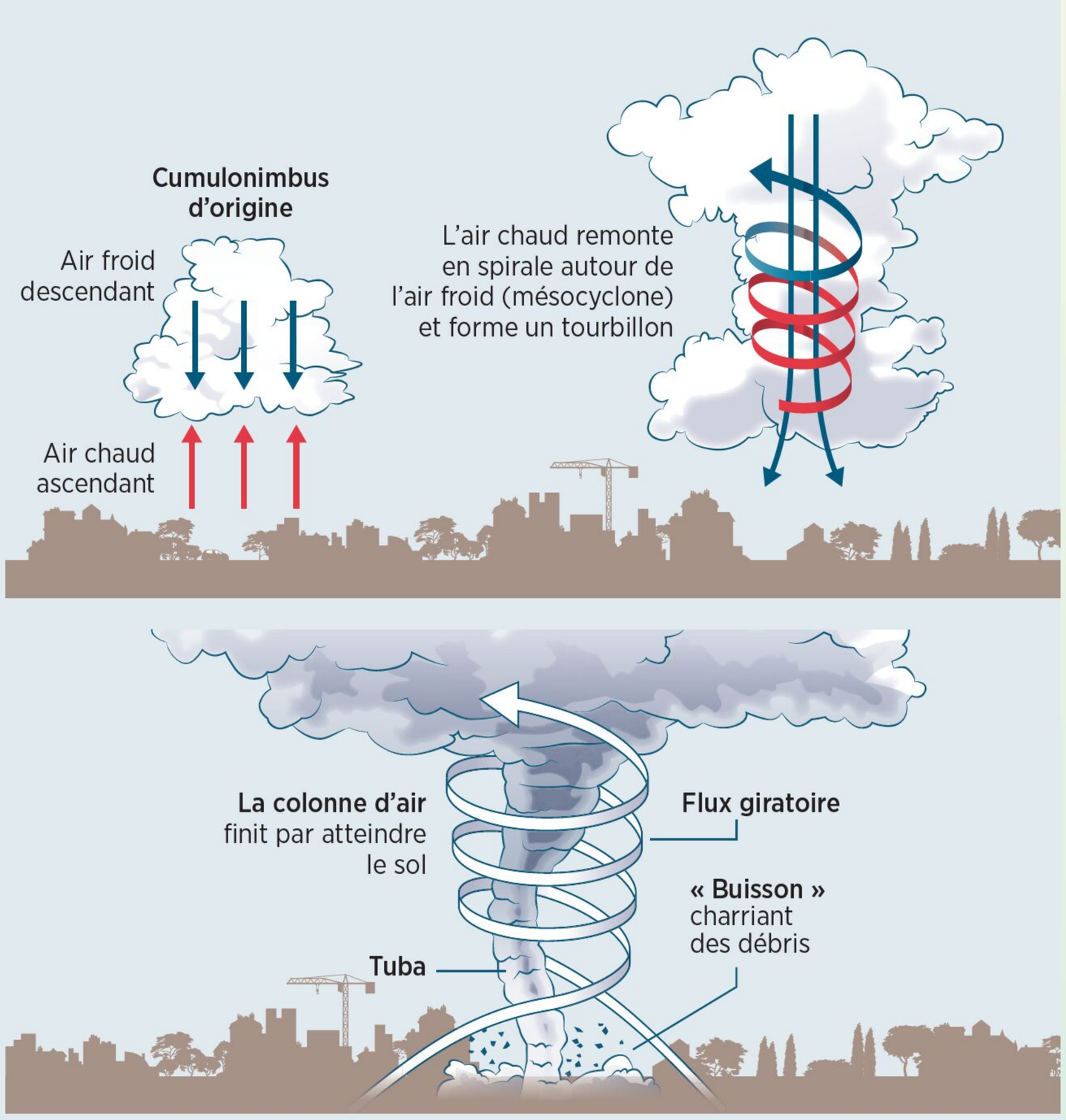

Éclairs et tonnerre s'expliquent par la répartition de charges électriques opposées à l'intérieur d'un cumulonimbus : les charges positives s'installent au sommet, les charges négatives près de la base. L'air étant mauvais conducteur, les charges s'accumulent jusqu'à ce que les différences de potentiel soient considérables et brutalement corrigées par une décharge gigantesque, l'éclair. Celui-ci chauffe brusquement l'air environnant à plus de 30 000°C, provoquant une dilatation explosive de l'air : le tonnerre. L'éclair et le tonnerre sont les manifestations, respectivement visuelle et sonore, d'un même phénomène.

# Spirales de violence

De l'air chaud aspiré par une dépression, des vents s'enroulant à plus de 200 km/h générant un vortex… Cyclones et tornades sont les plus intenses des phénomènes atmosphériques.

## LA TORNADE, TOURBILLON ÉPHÉMÈRE

Associés à des orages violents (dits supercellulaires, ou supercellules orageuses), les tornades sont des tourbillons de vents violents – jusqu'à 500 km/h – qui se forment sous les cumulonimbus, lorsqu'une couche d'air sec surmonte une couche d'air humide, avec une grande amplitude thermique. Les tornades sont des phénomènes locaux, brefs et intenses. Leur diamètre au sol varie de 100 mètres à 2 kilomètres. Elles se déplacent à grande vitesse sur une trajectoire de plusieurs kilomètres, mais leur durée ne dépasse pas deux heures. Bien que susceptibles de se produire n'importe où, elles sont plus fréquentes en Australie et en Amérique du Nord, où l'air chaud du Mexique rencontre l'air froid des Rocheuses.

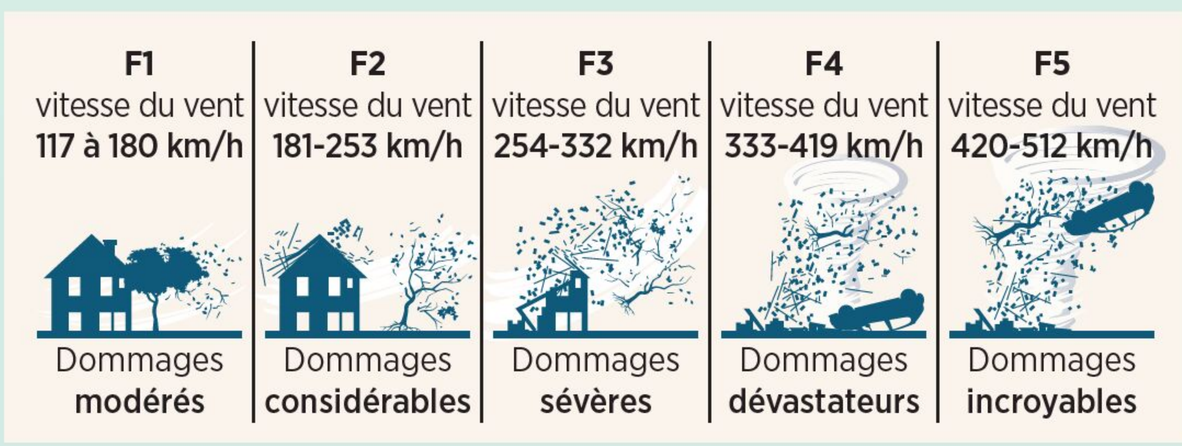



### ET AVEC LE RÉCHAUFFEMENT?

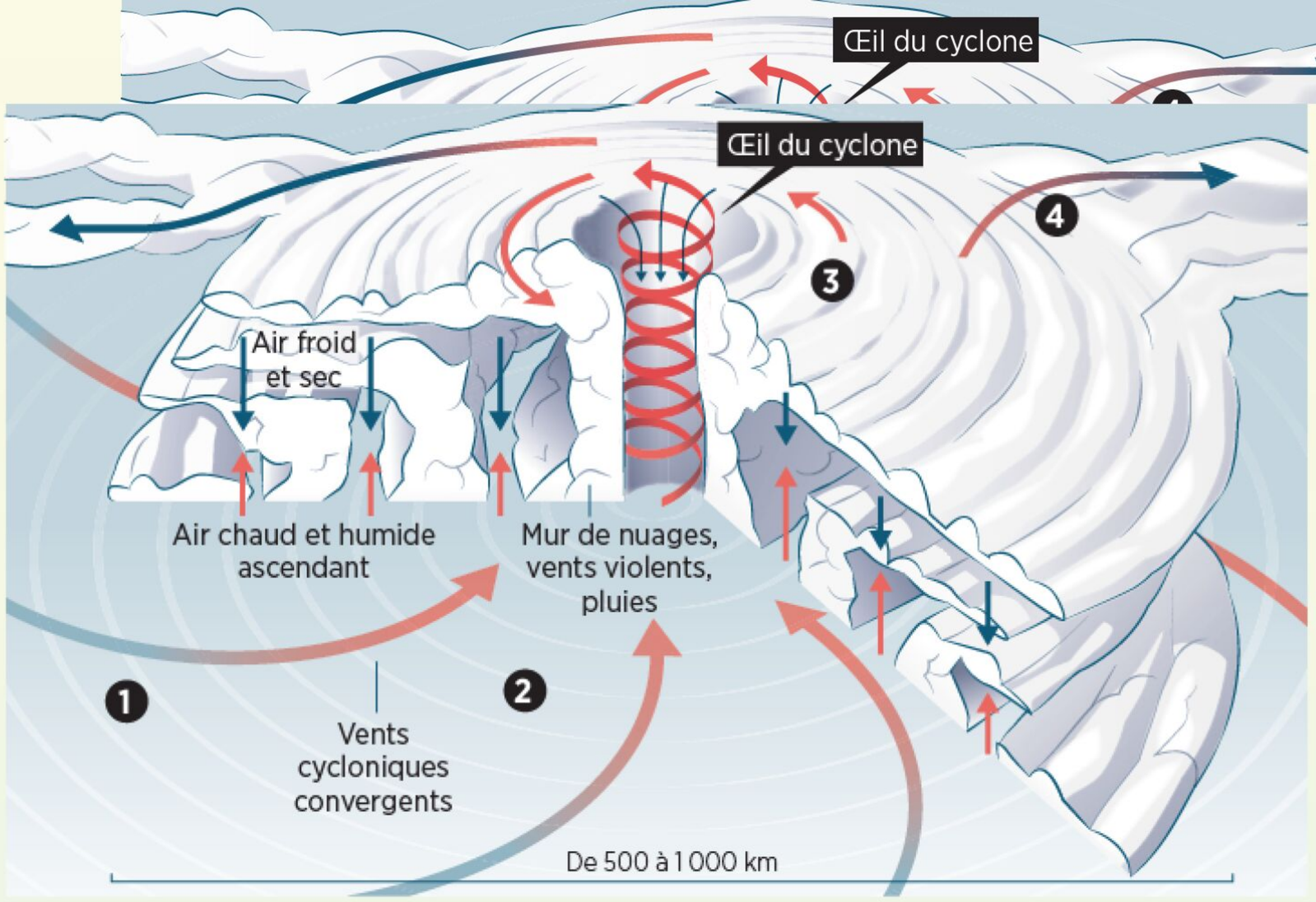
L'augmentation de la fréquence et de la violence des événements locaux comme les tornades n'est pas établie par le Giec (faible degré de confiance).
Pour les cyclones, l'accroissement de leur nombre n'est pas encore attesté faute de recul suffisant dans les observations satellite. Mais leur intensité s'accentue : des masses d'air plus chaudes libèrent davantage d'énergie, amplifiant la puissance du cyclone, avec des pluies et des vents plus forts.
Quant aux dômes de chaleur, s'ils ont toujours existé, le réchauffement climatique accentue leur intensité avec des températures ressenties au sol plus élevées.

### TROMBE OU TORNADE : NE PAS CONFONDRE

Les trombes d'air (au-dessus du sol) ou les trombes marines (en mer) sont aussi des tourbillons de vents violents, mais elles se forment généralement sans orage, à l'inverse des tornades. L'intensité des vents est souvent moindre.




**L'échelle de Fujita améliorée** permet d'estimer l'intensité d'une tornade en fonction des dégâts occasionnés, une mesure directe étant impossible.



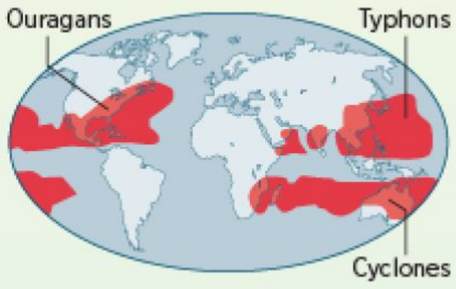

Pages réalisées
par Riva Brinet-Spiesser
Infographies : Philippe Puiseux

1 En mer, un fort courant ascendant crée un dôme de basses pressions.

2 Un vent de surface chaud soufflant vers l'intérieur entraîne l'eau dans l'œil du cyclone.

3 Une colonne tourbillonnante se forme, entraînant les nuages.

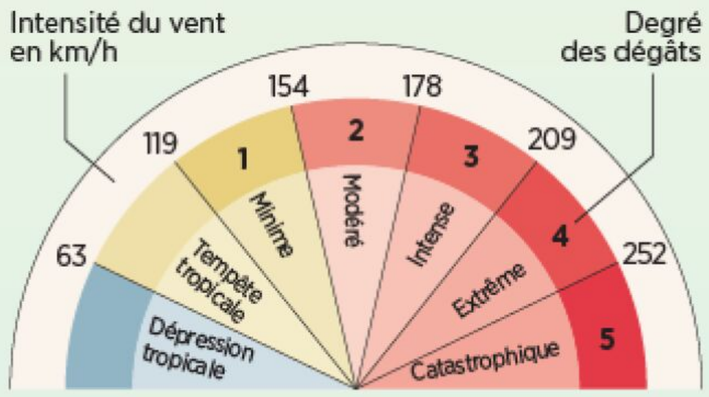
4 L'air refroidi en altitude est évacué vers l'extérieur.




Les cyclones sont appelés **ouragans** en Amérique du Nord, **typhons** en Asie et **cyclones tropicaux** dans le Pacifique sud.

## NAISSANCE D'UN MONSTRE, LE CYCLONE

Événements météo des plus dévastateurs, les cyclones naissent dans les régions tropicales, entre 5 et 15° de latitude – là où la force de Coriolis, due à la rotation de la Terre, est suffisante pour déclencher un phénomène tourbillonnaire. Leur formation nécessite deux conditions : des eaux de surface chaudes (plus de 26°C) et une absence de vent. Les cyclones se manifestent notamment de juin à novembre dans l'hémisphère nord et de novembre à mai dans l'hémisphère sud. Ils s'accompagnent de vents violents, d'une forte houle et d'un soulèvement du niveau de la mer entraînant des risques de raz-de-marée lorsqu'ils se rapprochent des côtes. Une fois sur terre, leur puissance s'affaiblit, l'océan n'apportant plus l'énergie thermique nécessaire.




**À partir de 119 km/h,** une tempête tropicale entre dans la catégorie des cyclones.

### VOUS AVEZ DIT « MEDICANE » ?

Ce terme, contraction de *mediterranean hurricanes* en anglais, qualifie de faibles ouragans extratropicaux formés en fin d'été, notamment sur les eaux chaudes de la Méditerranée. Ils présentent à la fois des caractéristiques des ouragans (œil, cœur chaud) et des tempêtes classiques (dépression, orage). Ils sont cependant plus rares et moins intenses que les ouragans.

### RECORDS

**4200 mètres de diamètre**
Tornade El Reno en 2013 (Oklahoma, États-Unis).

**56,7 °C**
dans la Vallée de la Mort (Californie, États-Unis) le 13 juillet 1913.

**2005 : 15 ouragans**
dont quatre de catégorie 5 (Emily, Katrina, Rita et Wilma).

### TROIS SITUATIONS DE CHALEUR INTENSE

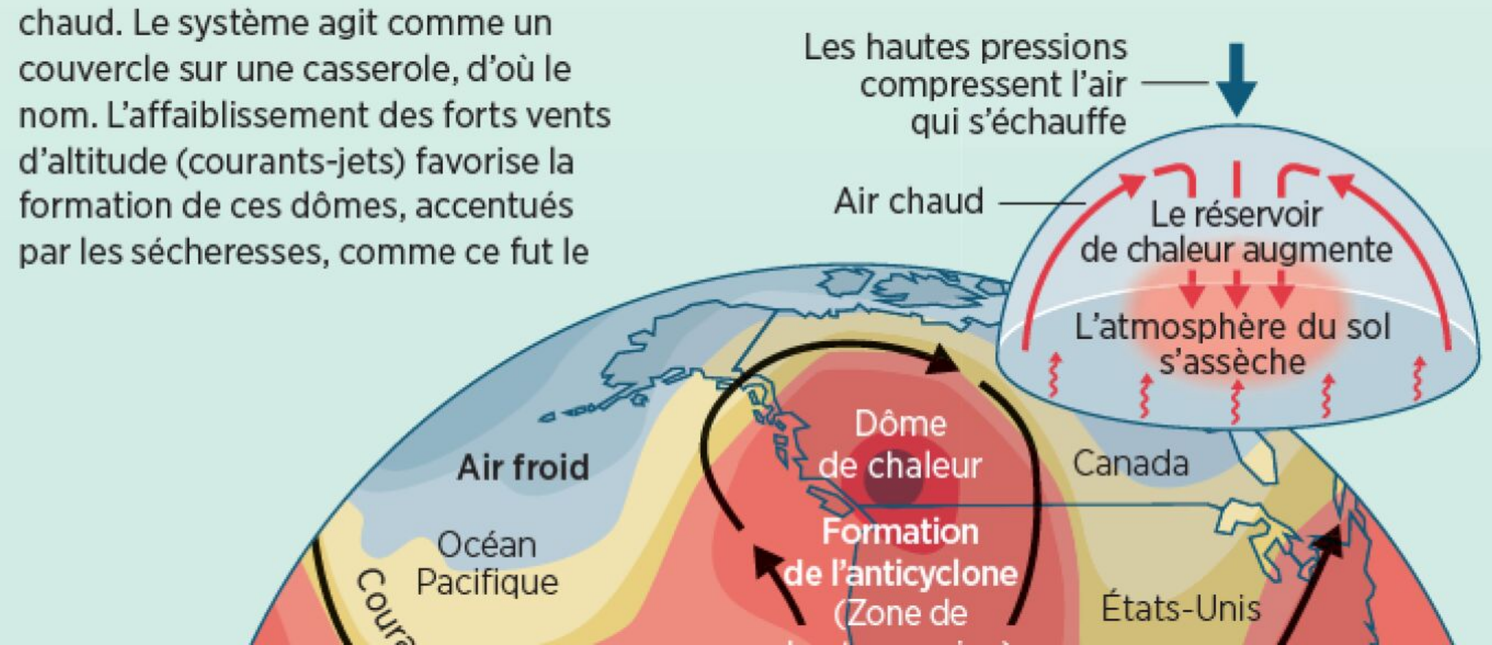
**Vagues de chaleur :** dues soit à des dômes de chaleur, soit à des vents chauds persistants, ce sont des périodes de plusieurs jours pendant lesquelles les températures sont nettement plus élevées que les normales, selon des critères qui varient selon les régions. On parle de « pic de chaleur » pour un épisode de 24 à 48 heures.

**Canicule :** températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période d'au moins trois jours. En France, chaque région a son propre seuil d'alerte.

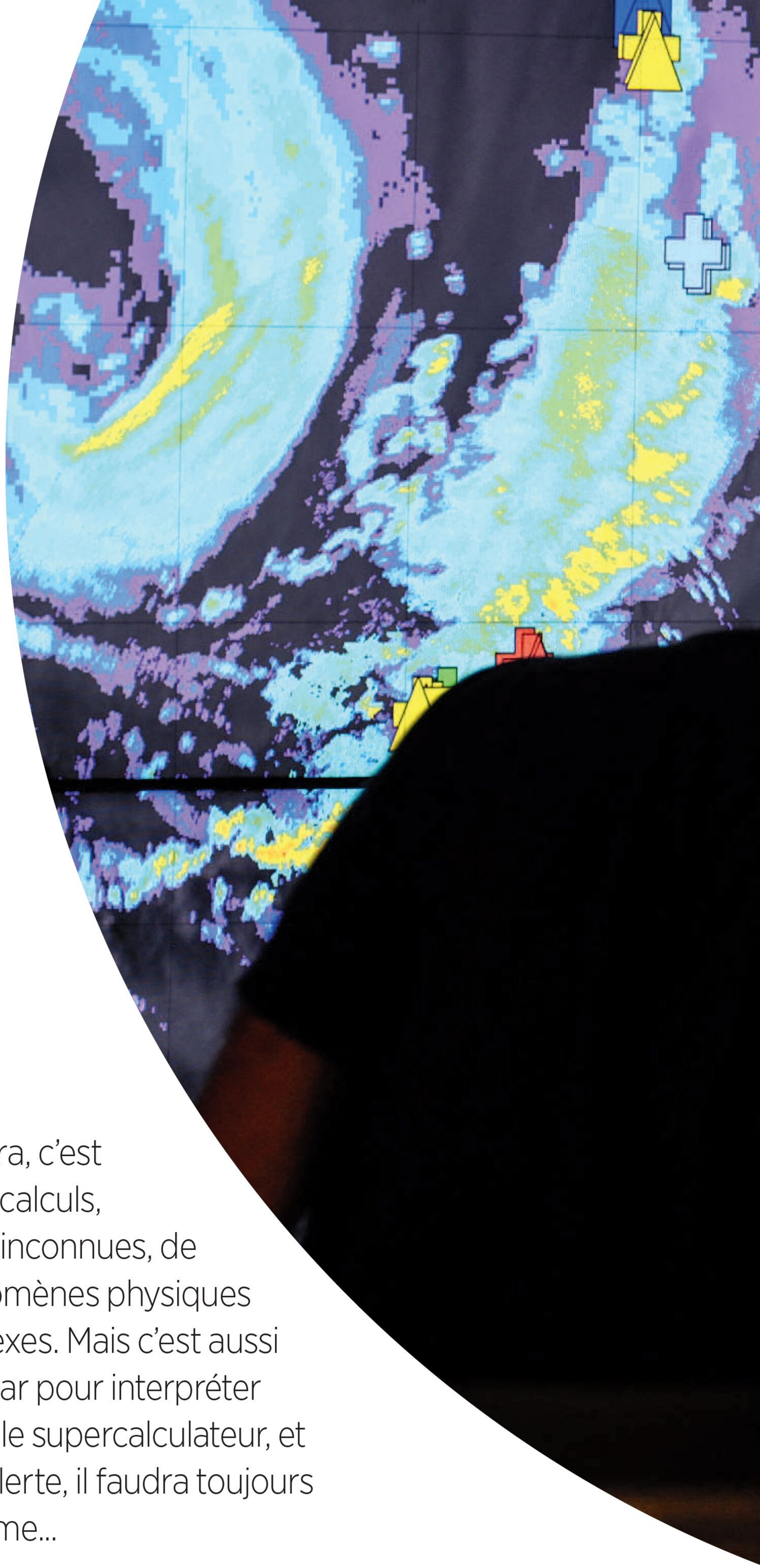
**Plume de chaleur :** à l'inverse d'un dôme, il s'agit d'un phénomène dynamique dû à une remontée de chaleur alimentée par les vents de sud et dessinant une langue d'air chaud sur les cartes.

## DÔME DE CHALEUR : UN COUVERCLE SUR LE SOL

Il s'agit d'un blocage anticyclonique qui persiste à un même endroit, pendant plusieurs jours et jusqu'à deux semaines, provoquant une stagnation et une amplification des masses d'air chaud. Le système agit comme un couvercle sur une casserole, d'où le nom. L'affaiblissement des forts vents d'altitude (courants-jets) favorise la formation de ces dômes, accentués par les sécheresses, comme ce fut le cas à l'été 2021, au Canada, où l'on a enregistré la température record de 49,1°C au pied de la chaîne des Rocheuses.



# PRÉVOIR



Prédire le temps qu'il fera, c'est d'abord une histoire de calculs, d'équations à multiples inconnues, de connaissance de phénomènes physiques incroyablement complexes. Mais c'est aussi une histoire humaine : car pour interpréter les résultats fournis par le supercalculateur, et le cas échéant lancer l'alerte, il faudra toujours un homme ou une femme...

RICHARD BOUHET / AFP

**Loin des nuages, du soleil et du vent,** le travail du météorologiste se déroule avant tout devant un écran. Ici, un expert suit le trajet du cyclone Belal qui a frappé l'île de la Réunion, le 15 janvier dernier.

# FERA-T-IL BEAU DEMAIN ?

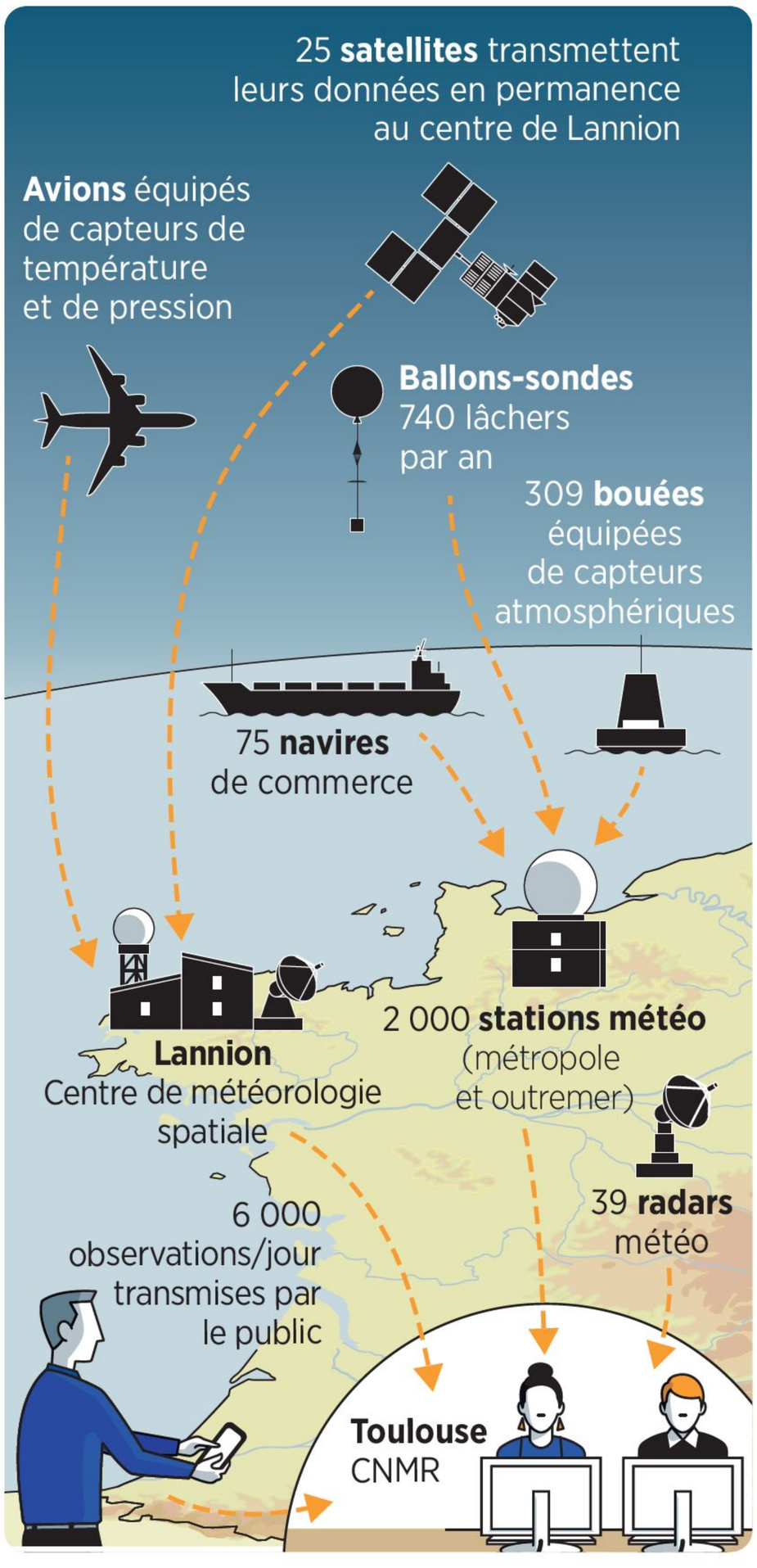
Collecter les observations sur le temps qu'il fait, les transformer en équations, simuler encore et encore l'avenir pour, enfin, concocter le scénario le plus probable. Le bulletin météo est l'aboutissement d'une longue chaîne bien rodée de savoir-faire d'experts.

## 1 Sur terre et dans les airs, recueillir des millions de paramètres

42 millions d'observations nourrissent chaque jour les modèles de Météo-France. Elles proviennent surtout de satellites, mais aussi de bouées dérivantes, de ballons-sondes ou même d'avions de ligne.

Depuis le début du XXe siècle, la prévision météorologique est basée sur une idée : il est possible, grâce aux équations de la physique *(lire p. 34-35),* d'anticiper le comportement des masses d'air pour peu que l'on connaisse précisément leurs caractéristiques de départ. *«Et le rôle d'un service d'observation est d'acquérir et de diffuser ces données en temps réel*, explique Gwenaëlle Hello, directrice des services d'observation de Météo-France. *Une fois "assimilées", c'est-à-dire mises en forme, elles iront alimenter les modèles numériques chargés de réaliser les calculs* (lire p. 36-37). *Puis elles seront utilisées à nouveau par les prévisionnistes pour "ajuster" les prédictions à l'évolution de la situation sur le terrain.* » Température, pression, humidité, précipitations, force et direction du vent… pas moins de 42 millions d'observations réalisées en France et à l'étranger nourrissent chaque jour le modèle Arpège de Météo-France. Encore plus glouton, son homologue Arome en engloutit 1,5 million… par heure !

**90 % des informations recueillies** sont fournies par les satellites, qu'ils soient défilants, faisant le tour du globe en deux heures à 850 kilomètres de la Terre, ou géostationnaires, à 36 kilomètres de la planète : ils tournent alors en même temps qu'elle, la scrutant d'un même point situé au-dessus de l'équateur. Sur terre, les divers instruments mesurent chacun les mêmes paramètres : pression, vent, humidité, précipitations, température…




PHILIPPE PUISEUX

La mise en œuvre d'une telle chaîne se heurte à de multiples difficultés. La principale : un bulletin météo doit être utile, donc à la fois précis et rapidement disponible. Ce qui suppose de multiplier les points d'observation et de pouvoir communiquer très vite les résultats à un centre météo, comme celui de Météo-France à Toulouse. Depuis la création, en 1855, des premiers postes météorologiques français *(lire p. 64-67)*, les progrès ont été considérables. Les relevés au niveau du sol ont été complétés par d'autres réalisés en altitude avec l'arrivée, entre les deux guerres, du radiosondage, la transmission par radio des informations récoltées par des capteurs placés sur des ballons ascensionnels. La télédétection, qui consiste à analyser le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par une source, a ouvert la voie aux mesures à distance avec les avancées obtenues dans les années 1950 dans le domaine des radars. Puis un cap a été franchi avec le lancement, en 1960, du premier satellite météorologique, Tiros-1.

Les stations se sont par la suite peu à peu automatisées, les réseaux densifiés et homogénéisés. *« Celui de Météo-France a été complètement réorganisé à partir de 1996, dans le cadre d'un projet appelé Radome,* précise Gwenaëlle Hello. *Il fait appel à une variété d'équipements fonctionnant* in situ*, par télédétection ou à distance. »* Il comprend, répartis entre les territoires métropolitain et ultra-marins, 2 000 stations météorologiques autonomes, dont 75 à bord de navires de commerce. Mais aussi 39 radars dédiés à la mesure des précipitations, 19 sites de lâcher de ballons-sondes (dont 15 automatisés et 4 embarqués sur des bateaux), 300 bouées dérivantes et 9 autres ancrées, 6 lidars dévolus au dépistage des aérosols émis par les volcans et, placés sous ◆◆◆

ÉMILE LOREAUX/HANSLUCAS.COM

**Chaque jour à la même heure,** aux îles Kerguélen, est lâché un ballon-sonde. Tout au long de son ascension jusqu'à 20 kilomètres, il mesure température, pression, humidité et vitesse du vent.

## Adieu, précieux bénévoles !

Ils étaient les petites mains de Météo-France. Chaque matin, entre 7 h 30 et 9 heures, quelque 2000 observateurs bénévoles en France relevaient la quantité d'eau dans leur pluviomètre et, pour certains, les températures minimale et maximale des dernières 24 heures. Ils décrivaient aussi le temps qu'il faisait, notaient la durée d'événements tels qu'un orage ou une averse de grêle… En 2024, ces veilleurs du temps ont laissé définitivement place à des stations automatisées. Formés et équipés par Météo France, les observateurs bénévoles étaient souvent agriculteurs, jardiniers municipaux, instituteurs, ou retraités. *« Leurs premières observations remontent à la fin du XIXe siècle*, raconte Patrick Josse, directeur de la climatologie et des services climatiques de Météo France. *On en a compté jusqu'à 3000 au début des années 2000. Leurs données n'ont jamais directement contribué à la prévision, mais elles participaient à l'étude de la climatologie, à la mémoire des climats locaux. »*

En 2015, Météo France constate que le nombre de ses observateurs bénévoles s'érode. Décision est prise d'opter pour des mesures automatisées. *« L'automatisation garantit des séries pérennes et offre en outre la possibilité d'accéder aux mesures en temps réel »*, souligne Patrick Josse. L'organisme termine actuellement de déployer les 750 stations automatisées, hébergées pour certaines… chez d'anciens bénévoles. Et pour perpétuer cet aspect participatif, il a inclus dans son application mobile la possibilité, pour chaque utilisateur, de renseigner le temps qu'il fait là où il se trouve et d'en témoigner avec des photos. **ÉLIANE PATRIARCA**

◆◆◆ la responsabilité de l'opérateur Météorage, une bonne centaine de détecteurs de foudre… Sans même évoquer les capteurs de température et de vent transportés par les avions sur certaines lignes. Ni entrer dans le détail des activités du Centre de météorologie spatiale de Lannion, où sont réceptionnées les données sur l'atmosphère, le sol ou la couverture nuageuse de 25 satellites météorologiques (8 géostationnaires et 17 défilants), portant non seulement sur la France, mais aussi sur le globe tout entier.

### Chaque pays doit fournir gratuitement ses observations

Sachant que le temps en un point donné dépend de phénomènes survenus ailleurs un peu plus tôt, il est indispensable de tenir compte de la situation dans les autres pays. Cette contrainte a, très tôt, fait de la discipline un domaine de coopération internationale. « *Le programme de veille météorologique mondiale de l'Organisation météorologique mondiale en est la meilleure illustration*, souligne Gwenaëlle Hello. *Il impose à chaque État membre de déposer en temps réel, gratuitement, l'ensemble de ses observations sur une plateforme. Mais ce n'est pas le seul exemple de collaboration. Météo-France bénéficie, pour les données satellites, des services de l'organisation européenne Eumetsat. Et certains de ses réseaux d'instruments, comme les bouées dérivantes, ont été renforcés dans le cadre de projets portés par l'Eumetnet, une structure qui réunit les trente et un services météorologiques du continent.* » La météo a beau être une affaire de routine, elle n'en est pas moins une ouverture sur le monde. **VAHÉ TER MINASSIAN**

# 2 Résoudre des équations… qui n'ont pas de solution

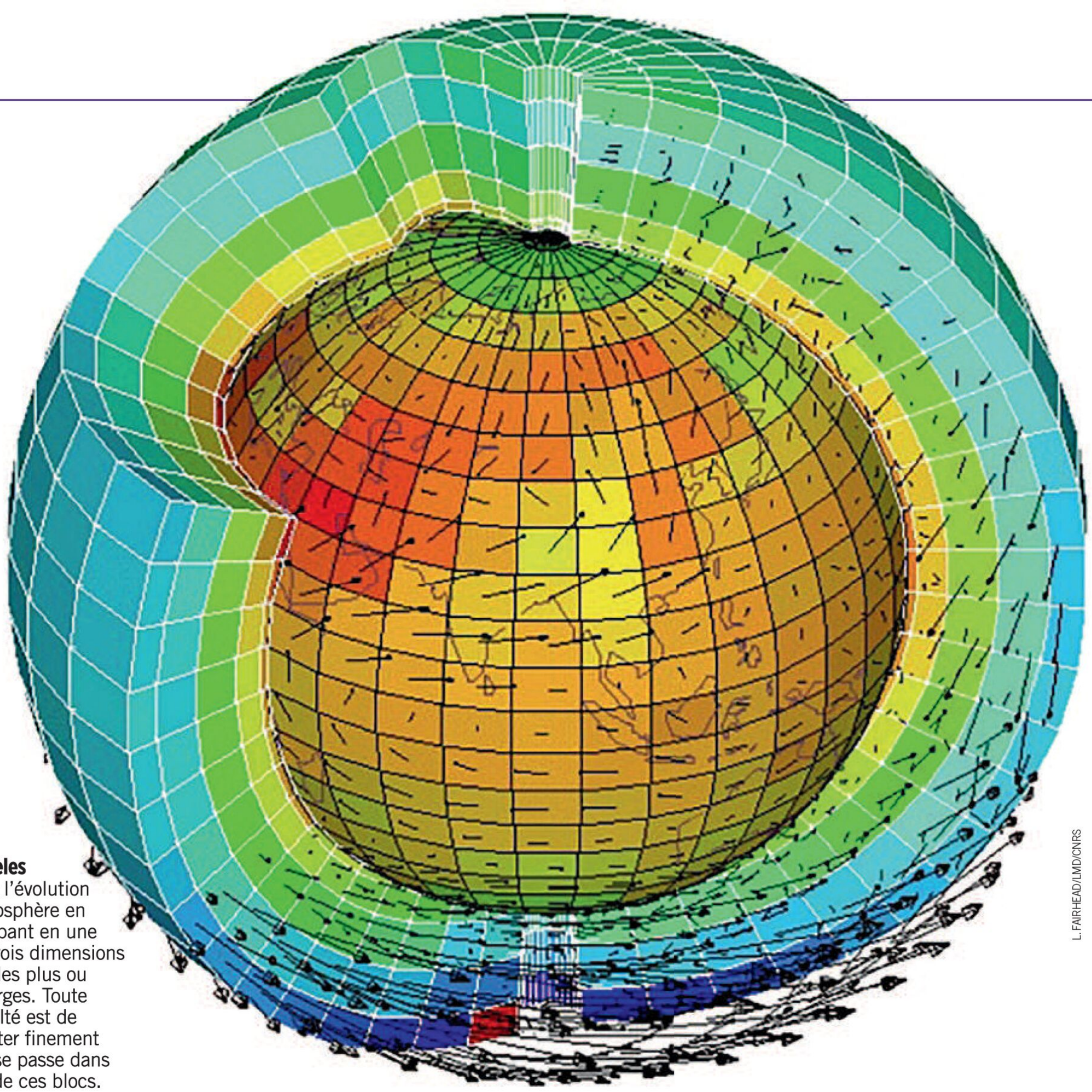
Mélange de gaz en perpétuelle transformation, l'atmosphère est régie par la mécanique des fluides. Un domaine chaotique qui ne peut être mathématisé qu'approximativement.

Pour prévoir le temps, *« la connaissance des processus en jeu dans l'atmosphère est primordiale »*, reconnaît Bernard Legras, directeur de recherche émérite au Laboratoire de météorologie dynamique. Et des processus en jeu, il y en a beaucoup. L'atmosphère étant un mélange de gaz, c'est la mécanique des fluides qui régit ses mouvements, c'est-à-dire l'évolution de la vitesse des molécules d'air, de leur température, de la pression atmosphérique et de leur hygrométrie. Il faut aussi considérer ce qui transforme ces différents paramètres : l'irradiation solaire qui modifie la température, les changements d'état de l'eau, le relief qui influe sur les courants aériens, la végétation, la rotation de la Terre, et même les interactions chimiques entre les différents gaz de l'atmosphère…

**Vidéo du CEA,** «Les équations de Navier-Stokes», sciav.fr/Navier-Stokes

**Billet de David Louapre,** «La Mystérieuse Équation de Navier-Stokes, sciav.fr/equationNS

Le problème est que la mécanique des fluides est décrite par un ensemble d'équations très spéciales, appelées « équations de Navier-Stokes » car mises au point par le Français Henri Navier en 1822 et l'Irlandais George Gabriel Stokes en 1845. *« Ce sont des équations aux dérivées partielles qui décrivent le mouvement d'un fluide, donc l'évolution du champ de vitesses de toutes les particules qui le composent,* précise Isabelle Gallagher, professeure à l'École normale supérieure. *Elles sont non linéaires et non locales, c'est-à-dire que si l'on change quelque chose quelque part, ça change tout ! Personne n'en a jamais démontré de solution unique.* » Leur résolution est même l'un des sept défis proposés en 2000 par l'Institut de mathématiques Clay, avec, à la clé, un prix d'un million de dollars. Elles servent à modéliser les mouvements de l'atmosphère, mais aussi les courants océaniques, les courants d'air autour des ailes d'avion ou la circulation du sang dans les artères. Bien qu'elles respectent les grands principes physiques, comme la conservation de l'énergie ou de la masse, on ne peut pas résoudre ces équations analytiquement. Pour un fluide très visqueux comme l'huile d'olive, l'écoulement sera toujours laminaire, c'est-à-dire sans mouvement intempestif. Mais l'air est très peu visqueux… Les écoulements se produisent donc de manière chaotique, avec de nombreux tourbillons. C'est la turbulence, qu'on ne sait modéliser finement que pour des cas très simples.



L. FAIRHEAD/LMD/CNRS

**Les modèles** simulent l'évolution de l'atmosphère en la découpant en une grille à trois dimensions aux mailles plus ou moins larges. Toute la difficulté est de représenter finement ce qu'il se passe dans chacun de ces blocs.

Pour intégrer ces équations dans les calculs, il faut donc réaliser des approximations, par exemple considérer que le fluide, l'air dans le cas de la météo, est incompressible. Ce qui n'est pas vraiment le cas, car son volume dépend de la pression atmosphérique et de la température. Mais en faisant abstraction de cette propriété, les météorologistes peuvent décrire pas à pas l'évolution des vitesses de chaque élément de l'atmosphère dans de vastes simulations numériques.

Se pose alors la question des conditions initiales. « *C'est un autre problème des équations de Navier-Stokes,* reprend Bernard Legras. *Comme l'a démontré le mathématicien et météorologiste Edward Lorenz en 1963, prenant l'image du battement d'aile d'un papillon qui changerait complètement le résultat d'une simulation numérique s'il était on non pris en compte, les équations sont très instables. Les solutions divergent très vite.* » C'est pourquoi les prévisions météorologiques ne sont concevables que sur un délai maximal de 15 jours, avec des résultats valables seulement sur 5 jours.

**JACQUES-OLIVIER BARUCH**

## Un papillon dans les simulations

**Contrairement à ce que chante Bénabar et à ce que croit la majorité de la population, le battement d'aile d'un papillon ne provoque pas, ou non, un ouragan aux antipodes. Mais le prendre en compte ou non dans les simulations numériques peut engendrer deux prévisions complètement opposées. La cause ? La sensibilité aux conditions initiales des équations de Navier-Stokes ! Edward Lorenz a pris cet exemple car si l'on place sur un repère orthonormé l'évolution de points différents, ceux-ci divergent rapidement mais se retrouvent tous sur une figure particulière, un « attracteur étrange ». Dans le cas de l'évolution de trois paramètres météorologiques, cette figure a la forme d'un papillon.**

TOM MENS

**L'effet papillon.** Tenir compte ou non d'un infime paramètre peut engendrer deux résultats très éloignés.

# 3 Faire tourner des supercalculateurs pour produire un résultat parfait

Modéliser l'atmosphère en la découpant en petites boîtes, puis mouliner des millions de données : des opérations à réaliser en quelques minutes, qui requièrent des ordinateurs de plus en plus puissants.

Pour ses prévisions, Météo-France utilise des modèles de simulation : une représentation la plus fidèle possible de la réalité par des équations mathématiques. Apparus au début du XXe siècle, ce type de modèle s'est considérablement développé avec l'essor de l'informatique à partir des années 1970. Météo-France en met deux en œuvre. Arpege (Action de recherche petite échelle grande échelle) est utilisé depuis plus de trente ans et mis à jour tous les ans. Sa « maille », c'est-à-dire le niveau de détail avec lequel il découpe le globe terrestre pour représenter les phénomènes météo, mesure 11 kilomètres de côté pour le monde, et 5 kilomètres pour la France métropolitaine. Il peut prévoir le temps qu'il fera dans 12 heures et jusqu'à 5 jours. « *Outre l'atmosphère, Arpege intègre les reliefs avec toutes leurs irrégularités, la nature du sol, la végétation, l'urbanisation, ainsi que l'évolution de la température et du contenu en eau du sol…* », précise Alain Joly, directeur adjoint de la recherche au Centre national de recherche en météorologie (CNRM), implanté sur le site de Météo-France à Toulouse. Arpege possède aussi une composante verticale divisée en 105 niveaux. Si l'on considère les trois dimensions, cela revient à découper l'atmosphère en millions de boîtes de chaussures… Cependant, certains phénomènes, trop complexes ou qui se produisent à une échelle inférieure à la maille du modèle, ne peuvent être représentés par celui-ci. Ils font alors l'objet d'une « paramétrisation », basée sur des observations, qui permet de les intégrer au modèle. C'est le cas par exemple de la convection verticale, lorsque l'air chaud et humide proche de la surface monte dans l'atmosphère, où il se refroidit et redescend, avant de se réchauffer à nouveau… et de recommencer le cycle. Un phénomène qui joue un rôle majeur dans la formation des nuages.

### 21,48 millions de milliards d'opérations en une seconde

Outre Arpege, Météo-France exploite depuis 2008 un autre modèle, baptisé Arome (Applications de la recherche à l'opérationnel à mésoéchelle). Plus précis, il ne couvre que l'Hexagone et les pays limitrophes. Sa maille est de 1,3 kilomètre et il fournit une prévision à courte échéance (moins de 48 heures). Contrairement à Arpege, il intègre la convection verticale. Arome est particulièrement utilisé pour la prévision et l'alerte de phénomènes violents. Enfin, il existe une prévision à moyen terme (à 15 et 40 jours) et saisonnière (tendances à 6 mois), basées sur un modèle développé avec le Centre européen de pré-

## Turbulences à Météo-France

**L'ordinateur, désormais dopé à l'IA, va-t-il rendre inutile l'intelligence humaine ? *« Un modèle fournit différents scénarios possibles*, rappelle Marc Pontaud, directeur de la recherche à Météo-France. *Mais il revient toujours au prévisionniste d'analyser, de retenir un scénario privilégié et de le décliner en informations claires. Et surtout, d'établir un dialogue fluide avec les services de l'État lors de situations menaçantes. »* Pourtant, les effectifs de Météo-France sont passés de 3600 en 2008 à 2500 en 2022, alors que 150 postes seraient vacants, faute de spécialistes. D'où un mécontentement du personnel, qui s'est traduit par un mouvement de grève en décembre dernier. En cause, le lancement en novembre d'une réorganisation de la chaîne de publication des prévisions météorologiques, dénommée 3P (Programme Prévision Production), destiné à pallier le déficit d'expertise humaine. Par exemple, les prévisions autrefois supervisées par des prévisionnistes régionaux avant publication sur le web ou via les applis ne le sont plus que par un seul, pour la France entière. Ce qui aurait provoqué la publication de prévisions fantaisistes. Comme ce 28° annoncé pour Strasbourg en décembre…** PIERRE VANDEGINSTE

FRED SCHEIBER / AFP

**À Toulouse, Météo-France** dispose désormais de deux supercalculateurs : Belenos (ici) et Taranis, capables de traiter plus de 40 millions de données d'observations par jour pour produire des prévisions basées sur des dizaines de scénarios.

vision météorologique à moyen terme *(lire p. 42-43)*.

Pour que le prévisionniste, au bout de la chaîne, puisse donner le temps qu'il fera demain, il faut d'abord connaître le temps qu'il fait aujourd'hui – « l'état initial » du système. Ce, grâce aux données recueillies par les instruments. *« On ne dispose cependant pas de mesures pour chacune des "boîtes" découpées dans l'atmosphère*, précise Alain Joly. *La solution : utiliser une ébauche, c'est-à-dire la prévision la plus récente du modèle, puis la comparer avec les observations faites au même moment. »* Cette phase dite d'« assimilation », qui prend une quarantaine de minutes pour Arpege, permet d'obtenir l'état initial le plus proche possible de la réalité. La phase de calcul peut alors commencer. *« Nous devons simuler 24 heures de météo en à peine dix minutes pour Arpege et en trente minutes pour Arome, ce qui nécessite une puissance informatique maximale »*, souligne Alain Beuraud, chef de projet Calcul à Météo-France.

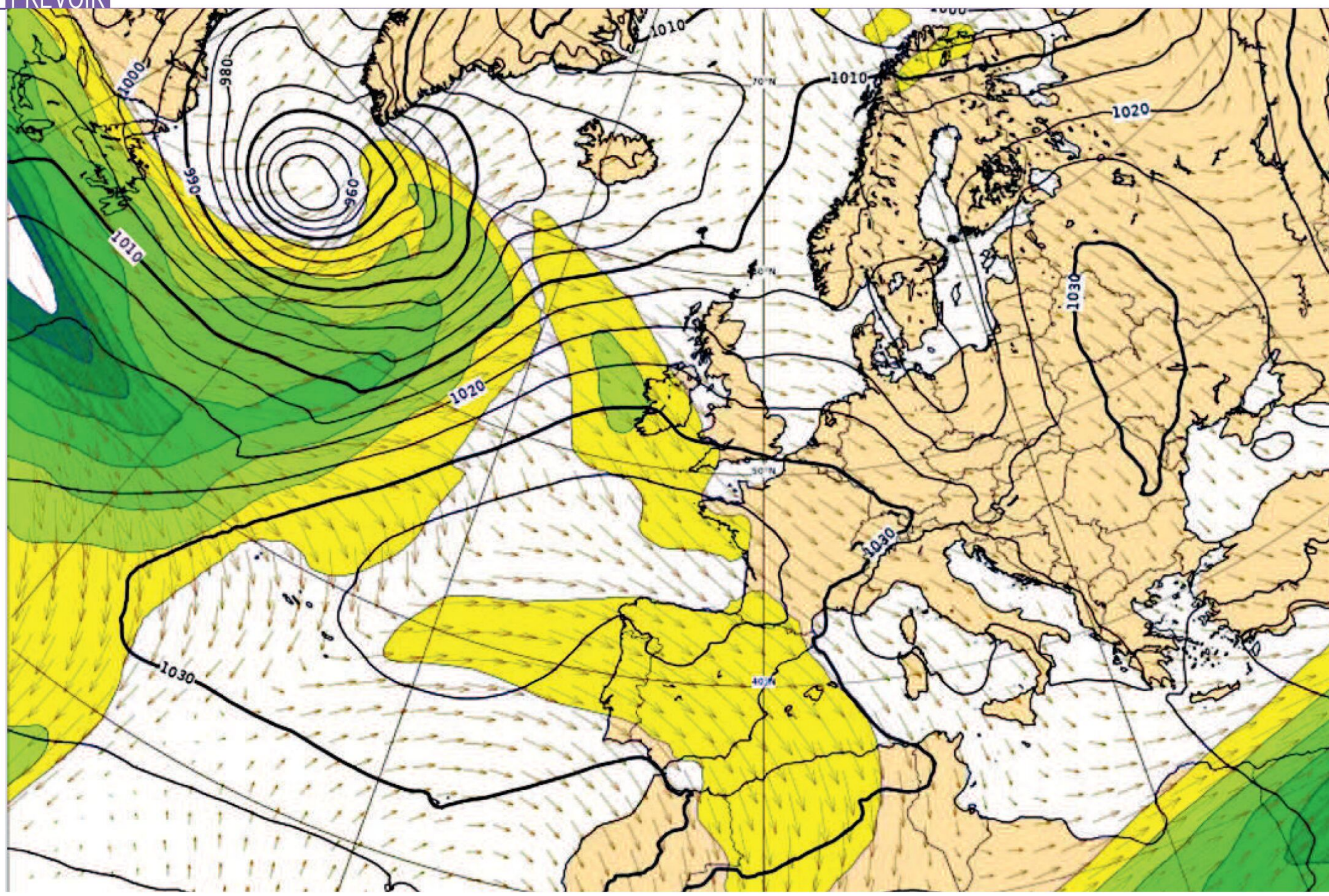
C'est là qu'interviennent les « supercalculateurs », qui tournent 24 heures sur 24. Météo-France en possède deux à Toulouse, Taranis (dieu du ciel et de la foudre chez les Gaulois) et Bélénos (dieu solaire). Chacun peut être affecté à la prévision opérationnelle ou à la recherche. Leur puissance totale ? 21,48 pétaflops… soit 21,48 millions de milliards d'opérations en une seconde. En novembre 2023, les deux ordinateurs figuraient au 93e rang des machines les plus performantes au monde. De fait, avec une puissance de calcul multipliée par 10 millions en trente ans, la prévision météo est passée de 2 à 5 jours.

Au CNRM, on continue à améliorer les modèles. Arome est ainsi passé en dix ans de 2,5 à 1,3 kilomètre, ce qui a nécessité une puissance de calcul… multipliée par 14 ! Et il pourrait voir sa maille affinée davantage, jusqu'à 750 mètres voire 500 mètres en 2027. Problème : *« On ne peut pas augmenter la puissance indéfiniment »*, constate Alain Beuraud. En effet, à coût égal, le gain de performance des superordinateurs ralentit depuis 2013, car la miniaturisation des composants électroniques a ses limites. *« Même avec des machines plus puissantes, il faut garder à l'esprit que la variabilité de l'atmosphère est énorme. Il restera toujours des incertitudes sur les données. Et le modèle ne reproduit jamais parfaitement la réalité »*, souligne Alain Joly. C'est pourquoi la « prévision d'ensemble » est de plus en plus utilisée. *« À la place d'un seul scénario "déterministe", qui dirait par exemple qu'il n'y aura pas de gel, on fait tourner le modèle plusieurs fois sur différents scénarios qui permettent de donner une probabilité ; par exemple, 25 % de chances que la température atteigne les -2 ou -3°C »*, explique Alain Beuraud. La prévision d'ensemble ne concerne pas toute la France, mais des zones d'intérêt particulier, par exemple lorsqu'une tempête est annoncée.

**JEAN-FRANÇOIS HAÏT**

**« LA VARIABILITÉ DE L'ATMOSPHÈRE EST ÉNORME. MÊME AVEC DES MACHINES PLUS PUISSANTES, IL RESTERA TOUJOURS DES INCERTITUDES SUR LES DONNÉES »**

**Alain Joly,** directeur adjoint de la recherche au Cnrm



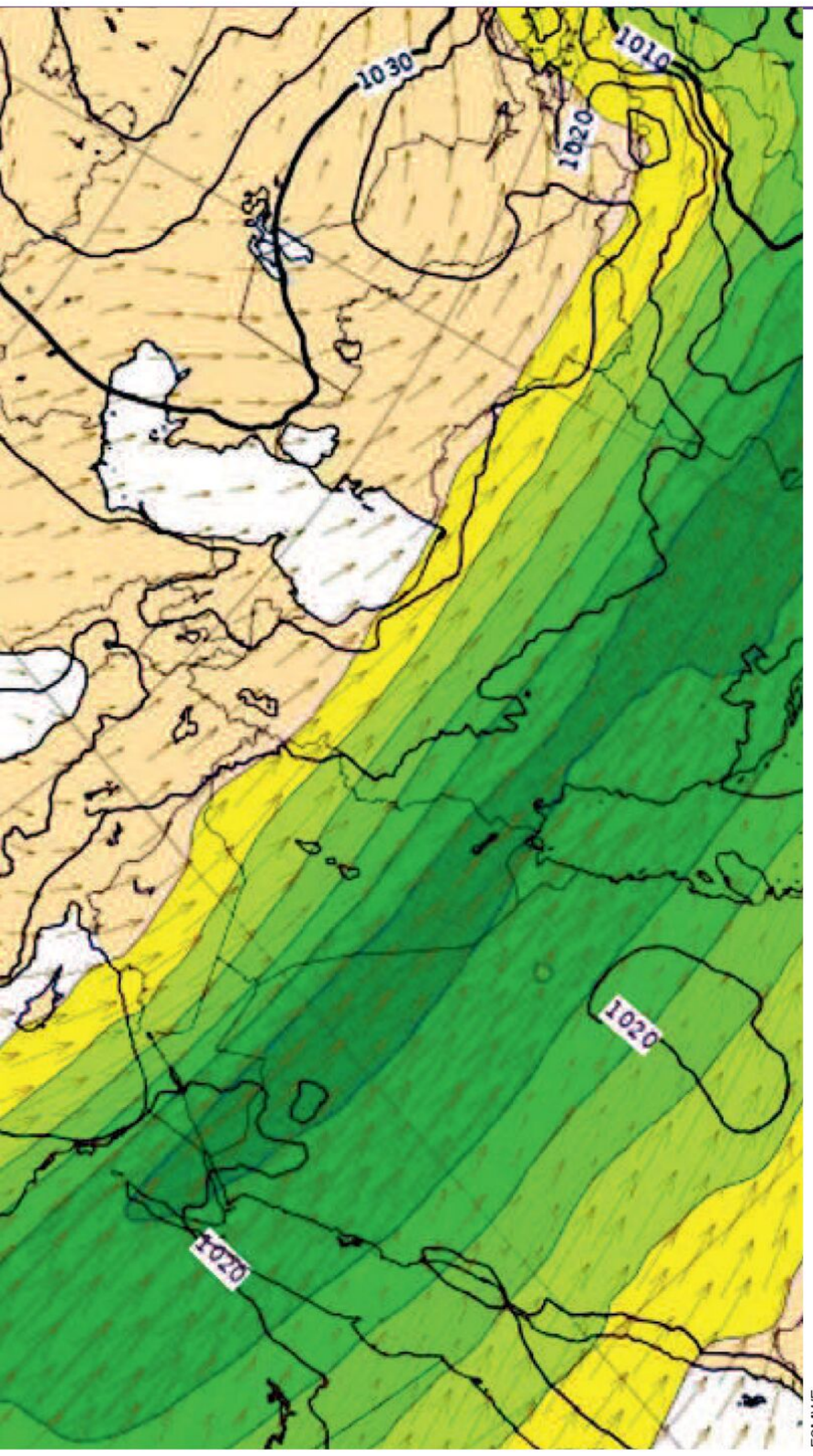

# Des simulations dopées par l'IA

Traitant des milliards de données, la météorologie est un terrain de choix pour l'intelligence artificielle. Cinq modèles sont aujourd'hui en concurrence. Et ce n'est qu'un début.

La prévision météorologique se prête particulièrement bien à la simulation par ordinateur. Un demi-siècle déjà que ses modèles appliquent les lois de la physique à l'état de l'atmosphère en résolvant des équations. Mais voilà qu'il y a une trentaine d'années, elle s'est mise à lorgner le potentiel de cette branche de l'intelligence artificielle qu'est l'apprentissage automatique qui permet, par des méthodes statistiques, d'entraîner un modèle à prédire l'évolution d'un système à partir d'un grand nombre de données.

*« Au début des années 1990, on commence à utiliser des techniques d'apprentissage automatique pour ce que l'on appelle le post-traitement : les prévisions issues de la simulation sont retouchées pour tenir compte de particularités locales, à l'aide d'un modèle entraîné sur des statistiques historiques,* raconte Marc Pontaud, directeur de la recherche à Météo-France. *Pour la vitesse du vent, par exemple, le post-traitement consiste à tenir compte des effets de la topographie, tels que l'exposition sur une crête ou l'abri d'un creux de vallée. »*

Les années 2000 voient les débuts en météorologie d'une approche de l'apprentissage automatique très féconde, l'apprentissage profond. *« Nous avons d'abord commencé à remplacer des compartiments des modèles classiques, qui simulent certains phénomènes physiques intervenant dans la météorologie, par des réseaux de neurones,* poursuit Marc Pontaud. *Inspirés de leurs homologues biologiques, ceux-ci ajustent progressivement leurs paramètres d'interconnexion au cours de l'apprentissage sur un grand nombre d'exemples, jusqu'à prédire la situation future en fonction de celle fournie en entrée. Il se trouve que la simulation numérique de certains phénomènes physiques est très coûteuse en puissance de calcul, tandis que l'IA donne des*



ECMWF

**Le CEPMMT** publie non seulement les résultats de son propre modèle, l'AIFS (ici la pression moyenne au niveau de la mer et le vent, le 19 février), mais aussi ceux de ses concurrents, afin de les comparer.

*résultats certes moins précis, mais que l'on peut ensuite améliorer par la simulation. »*

Cette hybridation entre simulation et apprentissage automatique permet d'économiser de la puissance de calcul, de gagner du temps. Une tendance confirmée au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) *(lire p. 42-43)* : *« À partir des années 2000, nous avons tout d'abord fait appel à l'apprentissage profond pour accélérer certains aspects de notre modèle, l'Integrated Forecasting System (IFS),* indique Florence Rabier, sa directrice générale. *Mais en 2022, nous avons lancé le projet beaucoup plus ambitieux de réaliser un modèle de prévision reposant entièrement sur des réseaux de neurones ».*

## Une efficacité bien supérieure à celle de la simulation numérique

C'est la communauté de l'IA qui a proposé les premières tentatives de modèles par apprentissage profond à 100 %. En février 2022, une équipe du fabricant d'accélérateurs graphiques Nvidia dévoile le modèle FourCastNet, qui produit des prévisions pour la Terre entière avec une résolution de 0,25° (soit des mailles de 30 kilomètres environ près de l'équateur). Il ne surpasse pas l'IFS du CEPMMT, dont la résolution est d'ailleurs plus fine, mais revendique déjà, sur quelques critères, des performances comparables, et même parfois un peu supérieures : ses prévisions à 48 heures et au-dessous seraient plus fiables pour les précipitations, le vent ou la température.

En novembre 2022, le chinois Huawei lance à son tour son modèle, Pangu-Weather. *« Il donne de bons résultats pour la prédiction des trajectoires de cyclones tropicaux »,* reconnaît Florence Rabier. Un mois plus tard, Google DeepMind présente son GraphCast. En juin 2023, une équipe chinoise (Université Fudan et Institut Shanghai Qi Zhi) dévoile au public FuXi. *Last but not least,* le CEPMMT, après avoir introduit en octobre une première version de son AIFS (Artificial Intelligence/Integrated Forecasting System) avec un maillage très large (un degré, soit 111 kilomètres à l'équateur), dévoile en janvier 2024 un successeur qui s'aligne sur le maillage de 0,25 degré. Tous ces modèles ont été entraînés sur le même jeu de données, le très réputé ERA5 du CEPMMT, qui fournit des estimations heure par heure d'un grand nombre de variables climatiques atmosphériques, terrestres et océaniques à partir de janvier 1940. L'efficacité de ces modèles en termes de puissance de calcul est supérieure de quatre ordres de grandeur à celle de la simulation numérique. Ils peuvent fournir leurs prévisions en quelques secondes.

Chacun de ces modèles a ses points forts et ses points faibles, et il n'est pas aisé de les comparer entre eux, ni avec les modèles classiques. *« Notre AIFS fait encore mieux que Pangu-Weather pour la prédiction de la trajectoire des cyclones tropicaux,* assure Matthew Chantry, coordinateur apprentissage automatique au CEPMMT. *Mais il ne donne pas de bons résultats en ce qui concerne leur intensité, pas plus d'ailleurs que ses concurrents. »* Le CEPMMT publie chaque jour les prévisions de son AIFS mais également celles des quatre autres modèles disponibles. Chaque État membre de l'organisation européenne en fait ce que bon lui semble.

*« Tous ces modèles sont intéressants,* assure Marc Pontaud, *mais ils fonctionnent avec un maillage très large, alors que nous fournissons pour la France et l'Europe des prévisions avec des mailles beaucoup plus fines, jusqu'à 500 mètres. Nous travaillons sur un modèle IA qui sera entraîné à partir de nos bases de données, dont la maille est de 1,3 kilomètre sur l'Europe de l'Ouest. Notre maquette devrait être rendue publique à la fin de l'année. »* Les modèles par apprentissage finiront-ils par supplanter la simulation numérique ? *« Les deux approches vont cohabiter au moins pendant dix ans. Et sans doute, à terme, rester complémentaires. »*

**PIERRE VANDEGINSTE**

MÉTÉO FRANCE

**« LA SIMULATION NUMÉRIQUE PEUT ÊTRE TRÈS COÛTEUSE EN PUISSANCE DE CALCUL. TANDIS QUE L'IA DONNE DES RÉSULTATS CERTES MOINS PRÉCIS, MAIS QUE L'ON PEUT ENSUITE AMÉLIORER PAR LA SIMULATION »**

**Marc Pontaud,** directeur de la recherche à Météo-France

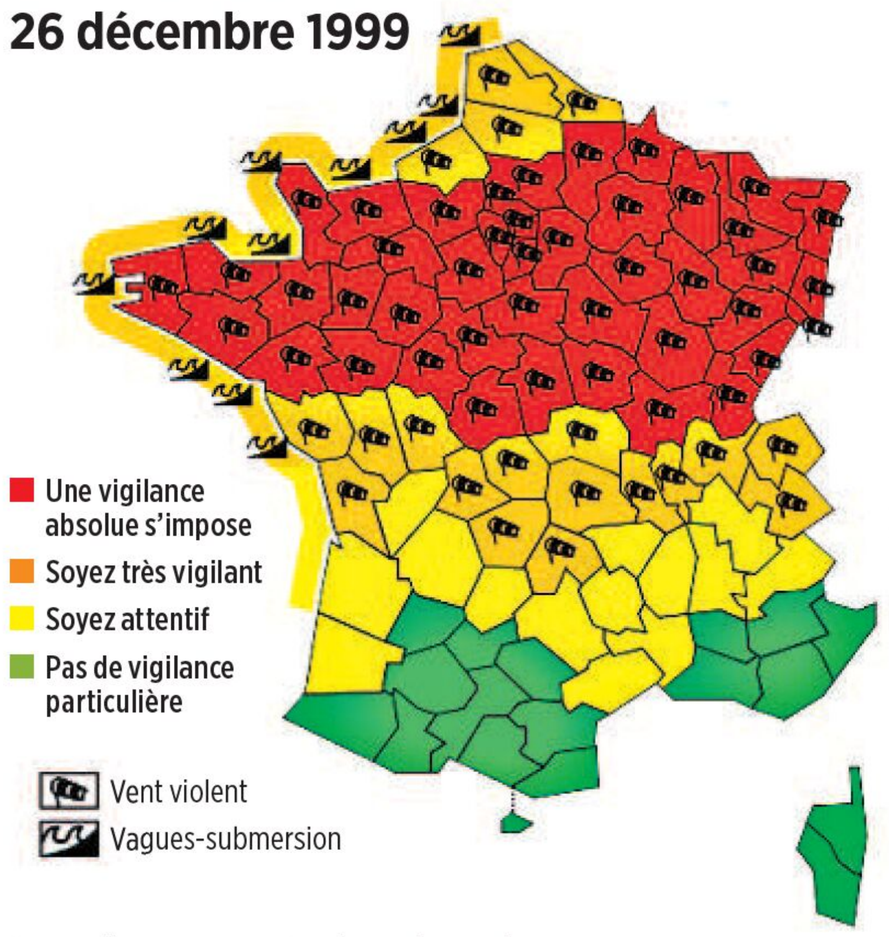
# Cartes de vigilance : alerter sans se tromper

Vert, jaune, orange, rouge. Plus de vingt ans que ces quatre couleurs ont intégré le bulletin météo, indiquant à chacun les précautions à prendre. Mais évaluer l'intensité d'un épisode dangereux est un art délicat. Et, pour les prévisionnistes, une lourde responsabilité.

Le 8 janvier 2023, des précipitations neigeuses ont affecté la Normandie et l'Île-de-France, provoquant d'énormes bouchons en région parisienne et la fermeture de l'autoroute A13. Des centaines de conducteurs ont ainsi été bloqués et… mécontents. La veille, Météo-France avait placé 40 départements du nord de la France en vigilance jaune – seulement – pour « grand froid », mais non pour « neige ». Voilà donc l'organisme de prévision sur la sellette. Lequel a dû s'expliquer. En l'espèce, entre –5 °C et +1 °C, il reste délicat de pronostiquer si, en plaine, des nuages donneront de la neige ou de la pluie.

Cet épisode récent met en relief les responsabilités qui incombent désormais à l'institution toulousaine en matière d'alertes météo et de précautions à prendre par la population. L'exercice n'est pas nouveau. La première carte de vigilance produite par Météo-France l'a été en octobre 2001. À l'origine de cette innovation, les dévastatrices tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999. Certes, les prévisionnistes de Météo-France avaient bien anticipé les deux dépressions, estimé qu'elles présentaient tous les aspects de « bombes météorologiques » de grande violence, et pu diffuser un bulletin d'alerte vingt-quatre heures avant que Lothar ne touche l'ensemble du territoire. Mais à l'époque, l'institution publiait des cartes de prévision sans fournir de conseils aux particuliers. *« Météo-France envoyait des bulletins à la Sécurité civile afin qu'elle se prépare à secourir les gens potentiellement affectés par l'événement,* raconte Benoît Thomé, directeur des relations institutionnelles à Météo-France. *Il nous a semblé que ces avertissements devaient être diffusés également à la population avec un code clair, compréhensible par tous et par le moyen accessible au plus grand nombre, la télévision.* » L'idée fait d'autant plus son chemin qu'il apparaît que de nombreuses victimes de Lothar et Martin l'ont été par inconscience. Certains des quatre-vingt-douze morts et des deux mille blessés déplorés en décembre 1999 s'étaient rendus au bord de la mer pour prendre toute la mesure de la violence de la tempête. À l'évidence, une culture du risque manquait.

**Carte simulée du 26 décembre 1999**




MÉTÉO FRANCE

**Vingt ans après la tempête Lothar,** les ingénieurs de Météo-France ont simulé ce qu'aurait été la carte de vigilance du 26 décembre 1999. Quarante-six départements français auraient été placés en alerte rouge, dix-neuf en orange.

## Les prévisionnistes, seuls maîtres de la décision

Le code couleur est désormais bien connu : vert pour une situation normale ; jaune pour des événements demandant une attention particulière, notamment en cas d'activité de plein air ; orange lorsque des phénomènes dangereux sont prévus et qu'il faut respecter les conseils de sécurité des pouvoirs publics ; enfin, rouge lorsqu'une vigilance absolue est exigée, avec restrictions de déplacement et mise sous protection des biens. Neuf phénomènes sont concernés : vent, vagues-submersion, pluie-inondation, crues, orages, neige-verglas, avalanches, canicule et grand froid. Deux de ces événements

DAVID SAUVEUR / AGENCE VU

font l'objet de zonages localisés. 25 départements comptent ainsi 46 zones sensibles au risque « vagues-submersion ». En montagne, 37 micro-régions ont été délimitées pour le risque « avalanches ». Pour ce dernier aléa, Météo-France maintient des postes de prévisionnistes à Chamonix, Bourg-Saint-Maurice, Grenoble et Briançon pour les Alpes, Tarbes et Foix pour la chaîne pyrénéenne.

Le choix des couleurs est un exercice délicat, car il implique d'apprécier au mieux l'importance d'un événement. *« On n'est pas Madame Soleil, on peut se tromper en toute bonne foi »*, s'exclame Benoît Thomé. Les prévisionnistes sont seuls maîtres de la décision. Ils ont la responsabilité du seuil d'alerte, oscillant ainsi entre la crainte de surestimer le phénomène, et donc de mobiliser inutilement les populations et la sécurité civile, et celle de mal évaluer l'intensité de l'épisode. Météo-France s'accorde une tolérance de moins de 15 % de fausse alarme et de moins de 2 % de « non-détection », aux conséquences bien plus graves.

L'épisode neigeux du 8 janvier montre cependant que le grand public est prompt à mettre en cause les prévisionnistes même si, à ce jour, les actions judiciaires restent rares. Ainsi, Météo-France n'a pas été poursuivi pour la chute d'un arbre – provoquée par une tornade – sur les spectateurs d'un concert en plein air, à Strasbourg, le 6 juillet 2001. Seule la ville a été tenue pour responsable du décès des treize victimes, et condamnée. Par ailleurs, *« des procédures ont été initiées par des agriculteurs estimant qu'ils n'avaient pas été correctement informés de vagues de gel tardif, mais elles n'ont pas abouti »*, signale Benoît Thomé. Selon la loi, Météo-France a une obligation de moyens, non de résultats. L'établissement doit tout mettre en œuvre pour prévoir où et quand un phénomène va intervenir, mais on ne peut lui imputer aucun dégât ni aucune victime.

**Probablement plus violente** que Lothar et Martin (quatre-vingt-douze morts en décembre 1999), la tempête Ciaran de novembre 2023 a pourtant fait bien moins de victimes (trois morts).

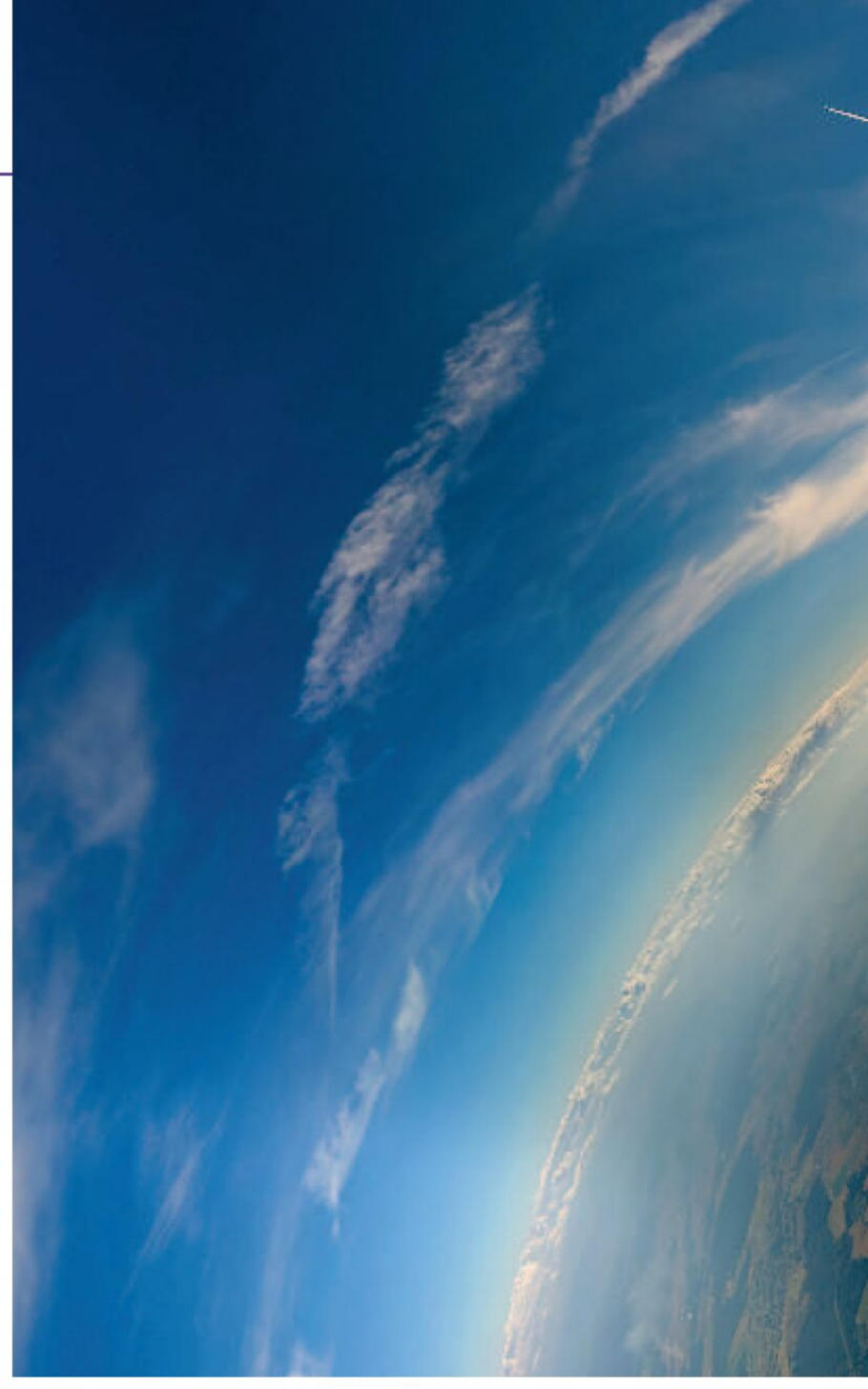
## Des messages d'alerte sur les smartphones

En vingt ans, les cartes de vigilance se sont doublées d'outils numériques comme les téléphones portables, qui relaient désormais directement les prévisions. Depuis 2008, une application permet de recevoir une alerte sur son smartphone, et depuis 2021 on peut suivre en temps réel les pluies exceptionnelles au niveau de sa commune. Lors de la tempête Ciaran, qui a affecté la Bretagne et le Cotentin les 1er et 2 novembre 2023, un nouvel outil d'alerte a été mis en œuvre. Auparavant réservé aux services de secours, le dispositif FR-Alert envoie un signal sonore spécifique sur le téléphone des personnes situées dans une zone concernée par un danger imminent, même quand l'appareil est en mode silencieux. Ce système d'alerte remplace ainsi en partie les sirènes, qui restent indispensables pour la population ne possédant pas de téléphone mobile.

Évidemment, on ne peut mesurer précisément l'efficacité d'un dispositif d'alerte, puisque son but premier est d'éviter les pertes humaines et les dommages matériels. Tout juste peut-on espérer que les cartes de vigilance dissuadent les curieux d'aller admirer l'océan déchaîné au péril de leur vie...

**LOÏC CHAUVEAU**

# Le moyen terme, nouvelle cible des météorologues



Prédire avec précision le temps qu'il fera dans dix jours, voire plus ? C'est l'ambition d'un centre rassemblant une trentaine d'États européens. Une gageure, tant l'atmosphère de notre planète est le royaume du chaos.

La « météo » ne cesse de progresser. Elle est passée en un siècle du doigt mouillé et des dictons populaires aux images satellite et aux supercalculateurs intégrant des milliards de données. Dans la dernière décennie, la fiabilité des prévisions pour la France a gagné une journée. Désormais, les informations données à quatre jours sont fidèles à ce qu'il va advenir. Mais comment prévoir à plus long terme ? Suivre l'évolution sur plusieurs jours de l'enveloppe fluide de la Terre est un exploit technique, tant notre atmosphère est chaotique.

Repousser les limites de la prévision météorologique, tel est le but du Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), organisation intergouvernementale créée en 1975 et regroupant 34 États. « *La couverture de nos modèles est mondiale, comme nos prévisions,* expose Matthieu Chevallier, chef de l'évaluation au département Prévision du CEPMMT. *Ils incluent les interfaces entre l'atmosphère, l'océan et les continents. C'est ce qui nous permet d'établir, au-delà des quatre jours, des prévisions entre dix et quinze jours.* »

Tout le « système Terre » est ainsi pris en compte dans une démarche proche des modèles non plus météorologiques, mais climatiques *(lire l'encadré p. 50)*. L'influence de la végétation, les glaces des pôles, les reliefs sont insérés dans une « photographie » de l'atmosphère et de ses hautes et basses couches, de la surface terrestre ainsi que de la profondeur des océans.

## Des performances dopées par un nouveau supercalculateur

Installé à Reading (Royaume-Uni), le CEPMMT est à la fois un institut de recherche et un service météo opérationnel. Il fournit chaque jour aux États membres des données numériques portant sur l'état global de l'atmosphère pour les quinze jours suivants. L'enveloppe atmosphérique de la Terre constitue en effet un tout. Le plus petit phénomène survenant, disons, aux Tropiques, peut avoir des répercussions fortes sur les zones tempérées deux ou trois semaines plus tard. Le centre apporte donc son concours aux services météo nationaux qui, eux, se focalisent sur leur territoire. Il dégage également des tendances à un mois, exprimées en termes de probabilités, comme le fait depuis quelques années Météo-France pour ses bulletins saisonniers trimestriels. Ses ingénieurs sont par exemple capables d'estimer en pourcentage le risque que le continent européen soit affecté par des dépressions atlantiques lors des quatre semaines à venir.

Cette prévision à moyen terme s'appuie bien entendu sur des supercalculateurs. Mis en service en juin 2022, celui de Bologne (Italie) – 9 000 mètres carrés au sol ! – a permis de multiplier la puissance de calcul quasiment par cinq. Nommé Leonardo, cet outil ultra-performant permet également de resserrer le maillage utilisé par le modèle du CEPMMT. Ce découpage numérique qui enveloppe la Terre est désormais constitué de mailles de 9 kilomètres de côté, l'atmosphère étant divisée en

ECMWF

**« NOUS SOMMES EN MESURE DE PRODUIRE CHAQUE JOUR DES ENSEMBLES DE CINQUANTE ET UNE PRÉVISIONS MÉTÉO À QUINZE JOURS D'ÉCHÉANCE »**

**Matthieu Chevallier,** chef de l'Évaluation au CEPMMT

**Pour dégager des tendances** sur plusieurs semaines, les météorologues doivent tenir compte des interactions entre l'atmosphère, la surface océanique et les continents. Mais aussi la végétation ou l'état des glaces des pôles.

SHUTTERSTOCK

137 niveaux – contre 18 kilomètres et 91 niveaux avant 2022. C'est un gain essentiel pour déterminer plus finement les zones affectées par des changements météo, l'intensité d'un événement et sa survenue dans le temps. Le CEPMMT peut notamment plus rapidement anticiper la trajectoire d'une dépression nord-atlantique, prévoir si elle va affecter l'Europe du Nord ou la France, à quel moment et avec quelle force…

### Prévoir des événements très localisés, comme les orages

Les observations de l'état de l'atmosphère, de ses remous et de ses turbulences bénéficient non seulement d'un maillage plus serré, mais aussi de la multiplication des scénarios météo. Les algorithmes peuvent en effet dérouler simultanément des trajectoires différentes pour mieux envisager les évolutions possibles d'un phénomène et en déduire son parcours le plus probable. *« Nous produisons ainsi chaque jour des ensembles de 51 prévisions météo* à *quinze jours d'échéance »,* expose Matthieu Chevallier. Des probabilités d'évolution de l'atmosphère plus fiables, qui permettent d'élaborer des scénarios au-delà des quatre à cinq jours actuels. De plus, comme pour Météo-France avec son modèle Arome, le CEPMMT s'intéresse à des mailles encore plus fines, de l'ordre du kilomètre, afin de prévoir des événements très localisés, comme les orages.

*« Le CEPMMT possède par ailleurs les archives météo les plus complètes au monde depuis les années 1950. Nous avons la mémoire des événements antérieurs, de la façon dont ils se sont passés, de leur dynamique »*, précise Florence Rabier, la directrice générale de l'établissement. Cette mémoire nourrit les modèles actuels des caractéristiques des événements météo passés, leur donnant ainsi une « expérience », comme l'acquiert un homme après quarante ans de travail. Elle permet ensuite de comparer la météo du passé avec celle d'aujourd'hui. Ainsi les climatologues peuvent-ils détecter l'influence du changement climatique sur la météo.

Les prévisions à moyen terme répondent à de nombreux enjeux, notamment dans le domaine de l'énergie solaire ou éolienne. Mais elles permettent aussi aux services météorologiques nationaux d'alerter leurs gouvernements de l'imminence d'événements extrêmes. Et donc de mieux s'y préparer. Ce que l'on constate déjà, puisque les tempêtes font beaucoup moins de victimes aujourd'hui qu'au siècle dernier.

**LOÏC CHAUVEAU**

## En attendant les mathématiques quantiques

**Pour la première fois, c'est un constructeur français qui équipe le CEPMMT : Atos. Si l'entreprise a doublé ses concurrents japonais et américains, auparavant fournisseurs habituels de l'organisme, c'est qu'elle a également proposé la création d'un centre d'excellence pour préparer le passage à une nouvelle génération de processeurs. *« Cela signifie un transfert de tous nos programmes informatiques dans ce nouvel environnement, tout en préfigurant l'utilisation des mathématiques quantiques dans dix ou vingt ans »*, se réjouit Florence Rabier, directrice générale du CEPMMT. Un transfert qui exige qu'experts des sciences numériques et chercheurs en sciences de la Terre collaborent, afin que le nouveau système ne soit pas une « boîte noire » pour les utilisateurs finaux que sont les prévisionnistes météo et climat.**

# DES PRÉVISIONS DE HAUTE PRÉCISION

Massifs montagneux, agglomérations denses, océans… Certains milieux très particuliers imposent aux prévisionnistes un travail ciblé intégrant des données spécifiques.

## L'altitude, plus qu'un simple paramètre

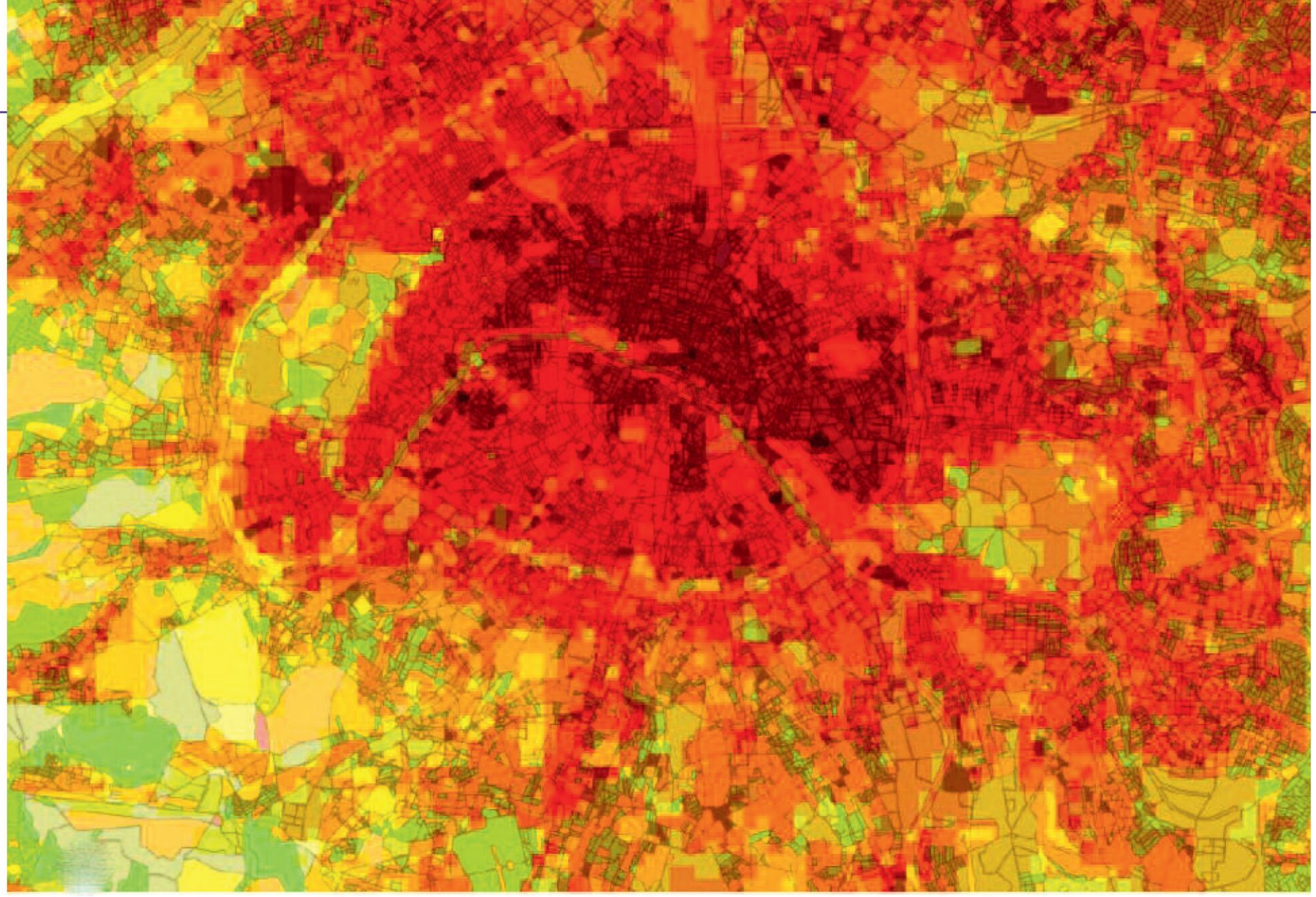
À Chamonix, le centre Météo-France publie chaque jour trois bulletins de prévisions, ainsi que, de novembre à juin, un bulletin d'estimation du risque d'avalanche (Bera). *« En montagne, le prévisionniste doit intégrer une troisième dimension : l'altitude,* explique le chef de centre, Gilles Brunot. *Les bulletins incluent donc toujours l'isotherme zéro, celle à laquelle la température atteint 0 °C. Et celle de la limite pluie-neige. »* De même pour les nuages : *« On précise leur altitude, car on peut être en dessous, dedans ou au-dessus ! »* Parmi les phénomènes spécifiques, *« certains sont bien anticipés par les modèles. Notamment l'influence du relief sur les précipitations : il les accentue du côté d'où vient le vent et les atténue, voire les annihile, sur le versant opposé. »* D'autres le sont peu ou mal, *« comme la limite pluie-neige ou les chutes de neige dans les vallées alpines lors des redoux. Car ces vallées sont trop étroites pour être simulées. C'est au prévisionniste de corriger, grâce à son expérience. »*

GUILLAUME LAGET / ONLYFRANCE.FR

L'été, on observe des brises provoquées par les différences de température. Par temps clair, la température augmente sur les versants exposés au soleil, l'air se réchauffe au contact du sol, devient plus léger et monte. La nuit, par ciel serein, le phénomène est inversé : le sol se refroidit, car il émet un rayonnement infrarouge qui n'est pas compensé par la chaleur solaire. À son contact, l'air se rafraîchit aussi et, alourdi, se dirige vers l'aval. *« Sur les glaciers*, poursuit le météorologue, *c'est la différence de température avec l'environnement qui produit des vents descendants l'été. »* Le relief favorise aussi la formation de cumulus à cause des brises montantes, et donc le risque orageux, mais aussi celle de nuages lenticulaires au-dessus des pics, lorsqu'un vent d'altitude vient « buter » contre le relief et s'élève.

Pour les avalanches, *« nous travaillons notamment avec les données du réseau d'observateurs que nous avons formés : secouristes, gendarmes ou CRS. Nous utilisons aussi un modèle qui simule le manteau neigeux »,* précise Gilles Brunot. Tout bon nivologue se doit de compléter ces informations par des sorties en ski de randonnée et l'observation à la jumelle… par la fenêtre. **ÉLIANE PATRIARCA**

**Le relief montagneux** peut provoquer des phénomènes saisissants, telle cette « mer » de nuages piégée entre les parois rocheuses dans le massif du Dévoluy (Hautes-Alpes).



©SANTÉ PUBLIQUE FRANCE

# Les villes traquent la chaleur pour mieux s'y adapter

Une chaleur étouffante, qui ne faiblit pas, empêche le sommeil, fatigue l'organisme… Quiconque réside en ville en été connaît bien ce que les météorologues, urbanistes et soignants appellent « îlot de chaleur urbain » (ICU). *« Ce phénomène est dû à l'inertie thermique des bâtiments qui, la nuit, relâchent la chaleur emmagasinée durant le jour. Dans la journée, la température d'une ville et celle de la campagne avoisinante sont le plus souvent comparables*, souligne Valéry Masson, chercheur au Centre national de recherches météorologiques, à Toulouse. *Mais la nuit, l'écart peut être de 4 à 5 °C pour une ville moyenne, et même 8 °C pour l'agglomération parisienne. »* Quant au bitume, imperméabilisant, il empêche l'eau du sol de s'évaporer et de rafraîchir l'atmosphère. Les systèmes de climatisation, quant à eux, *« peuvent rajouter 1 à 2 °C à l'extérieur »*, précise le météorologue.

**Paris et sa banlieue** sont particulièrement touchées par le phénomène des îlots de chaleur. Les différentes couleurs de cette simulation – du jaune (< 1 °C) au noir (> 8 °C) – représentent l'écart entre climat urbain et rural lors d'un épisode estival.

## Un écart de 3 °C entre espaces verts et îlots bâtis

La modélisation du phénomène est complexe et n'a été entamée qu'au début des années 2000. En France, le modèle TEB (Town Energy Balance) a été développé par Valéry Masson pour calculer les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère. Pour cela, on a dû simplifier la géométrie des rues. *« On utilise des données ouvertes comme celles d'OpenStreetMap pour estimer la hauteur des constructions »,* explique le chercheur. L'usage des bâtiments (habitation, bureaux) est déterminé de manière statistique. Les lois de la physique sont alors appliquées pour obtenir une estimation des transferts de chaleur. Depuis 2008, le modèle Arome de Météo-France *(lire p. 36-37)* inclut TEB pour les métropoles.

Jusque récemment, les mesures de température des agglomérations se faisaient un peu à l'écart, sur les aéroports par exemple, précisément pour ne pas être perturbées par l'effet de la ville. Aujourd'hui, Rennes, Dijon ou Grenoble ont installé des capteurs en nombre dans le centre. Côté recherche, une campagne a été menée à Paris en 2022 et 2023 afin de *« mieux comprendre les processus physiques pour valider le modèle, observer la variabilité de l'ICU et voir comment il se propage en hauteur ».* Outre les capteurs installés en permanence, des ballons-sondes et des drones ont été déployés. Ils ont mis en évidence un écart de température de 3 °C entre les parcs et les îlots bâtis. Une deuxième campagne, internationale cette fois, sera menée à l'occasion des Jeux olympiques pour inviter les services météo du monde entier à travailler sur ce thème. Objectif : perfectionner les modèles. D'ici quelques années, *« on pourra estimer l'îlot de chaleur à* ◆◆◆

◆◆◆ *l'échelle d'un quartier* », estime Valéry Masson.
À la clé, une précieuse information pour protéger des canicules les plus vulnérables… qui ne sont pas seulement les jeunes enfants et personnes âgées. « *La vulnérabilité dépend de trois facteurs* », explique Mathilde Pascal, chargée de projet à Santé Publique France. L'exposition à la chaleur, tout d'abord. La susceptibilité individuelle ensuite, qui varie avec l'âge, l'état de santé, etc. Enfin, la capacité d'adaptation, qui correspond à la possibilité de se soustraire à l'ICU par la climatisation ou l'accès à des lieux plus frais.
Mathilde Pascal et son équipe ont identifié cinq groupes, du plus au moins vulnérable. Le premier concerne le nord de Paris et la Seine-Saint-Denis. « *Ce n'est pas là qu'il fait le plus chaud, mais la capacité d'adaptation est faible dans des logements sociaux nombreux et occupés par des personnes à bas revenus. Ce groupe nécessite des actions importantes, y compris sur les inégalités sociales.* » Le deuxième groupe, c'est… Paris intra-muros. « *L'exposition y est très importante, mais la capacité d'adaptation aussi. Là, il faut travailler sur la climatisation, car son usage augmente l'ICU et renforce donc les inégalités sociales.* » Les groupes 3, 4 et 5 incluent la banlieue plus ou moins proche et urbanisée. « *Toutes les mesures d'adaptation à l'ICU doivent être compatibles avec son atténuation*, conclut la chargée de projet. *On doit concevoir un bâti qui fonctionne le plus possible sans climatisation, et revoir l'organisation du travail pour éviter les heures les plus chaudes.* » **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**

JEAN-FRANCOIS BADIAS/AP/SIPA

# Anticiper le moindre aléa susceptible de gâcher la fête

**Au tournoi de tennis de Roland-Garros,** les interruptions de match pour cause d'averse ne sont pas toujours évitables… mais elles peuvent être prévues de plus en plus précisément.

Sport, spectacle, tournage de cinéma… certains événements ne laissent rien au hasard, et certainement pas la météo ! « *Ces grands rendez-vous attirent beaucoup de monde sur de petits espaces,* rappelle Alexis Decalonne, qui dirige à Météo-France une équipe dédiée à ces prévisions ultralocales. *Il est donc essentiel de maîtriser les paramètres météo, notamment pour des questions de sécurité.* » Gérer le risque, comme pour le festival Jazz in Marciac, qui se déroule chaque année en pleine saison des orages, mais aussi anticiper les interruptions pour les médias diffuseurs, comme lors du tournoi de tennis de Roland-Garros.
Ces prévisions sont d'une précision temporelle et spatiale très fine. « *Pour Roland-Garros, nous sommes capables de localiser la pluie à l'échelle d'une rue, de savoir précisément quel court sera mouillé ou non* », précise le météorologue. Pour cette prouesse, il s'appuie sur des radars mobiles haute résolution et des prévisionnistes spécialisés.
Les besoins en prévision varient selon le type d'événement. « *Pour le tennis ou l'athlétisme, mais aussi le football ou le golf, la température est très importante. Elle peut imposer aux fédérations l'installation d'équipements de protection ou l'instauration de pauses supplémentaires lors des compétitions.* » Dans certains cas, les prévisions sont distribuées aux équipes, comme lors des grands prix de Formule 1. Dans d'autres, les fédérations refusent que les sportifs accèdent à ces données « *pour ne pas polluer les décisions* », confie Alexis Decalonne. C'est sensible, l'info météo ! **AGNÈS VERNET**

# Pas de sortie en mer sans le dernier bulletin

La météo marine et sa poésie… Qui n'a pas rêvé – bien au calme chez soi – de voyager à l'écoute de ses prévisions, si mystérieuses pour le profane? *« Avis de grand frais force 7, ou coup de vent 8 Beaufort de sud à sud-est en cours sur Finisterre et Cantabrico… »* Un bulletin de météo marine commence toujours par ces alertes pour vent fort à destination des marins qui auraient besoin d'anticiper un retour au port ou, au contraire, de rester sagement au large. La force du vent est chiffrée entre 0 et 12 *(lire p. 24-25)* et dès la valeur 7, Météo-France émet un bulletin météorologique spécial (BMS). À ce stade, en effet, on observe des lames déferlantes sur la mer qui écume et la navigation devient dangereuse.

Une fois décrites la situation atmosphérique générale et son évolution, le bulletin fournit des prévisions par zones. *« Prévisions jusqu'au samedi 6 janvier à 12 heures UTC. Golfe du Lion : nord à nord-ouest 6 à 7 mollissant 5 à 6 en soirée. Rafales. Mer agitée à forte, devenant localement très forte à l'est en fin de journée. Visibilité mauvaise sous pluie ou averses, parfois orageuses, s'atténuant en soirée. »* Quelle que soit la façade maritime, au large ou sur la côte, l'évolution du vent, celle de l'état de la mer et enfin la visibilité sont indiquées pour une période de 24 heures. Le vent peut s'atténuer (« mollir ») ou augmenter (« fraîchir »), et souffler en rafales dangereuses lorsqu'il varie brutalement de 10 nœuds (1 nœud marin vaut 1,9 km/h environ). L'état de la mer est codé entre 0 et 9 par l'échelle de Douglas qui qualifie la houle, c'est-à-dire les vagues qui se forment au milieu de l'océan sous l'action du vent. Plus celui-ci souffle avec force et se propage sans obstacle sur de longues distances, plus la houle est puissante. C'est ainsi que les rafales liées aux fortes tempêtes hivernales engendrent les vagues les plus importantes, qui menacent régulièrement le littoral. Hauteur de la mer et taille de la houle, mais aussi courants, amplitude de la marée, configuration des fonds marins et trait de côte : ces paramètres conditionnent le niveau de l'eau qui atteint la côte. Ils sont surveillés avec attention par le prévisionniste, qui déclenchera un BMS en cas d'alerte « vagues-submersion ».

**CAROLINE DEPECKER**

BAGGER/RITZAU SCANPIX/AFP

**Un marin averti en vaut deux…**
Grâce aux alertes diffusées par la météo marine, les bateaux peuvent rentrer au port en cas de temps menaçant.

**Soixante ans de météo marine sur France Inter :** https://sciav.fr/meteomarine_franceinter

# Des semis à la moisson, une météo millimétrée

Dans les champs, c'en est fini du petit coup d'œil sur l'horizon au soleil couchant : l'agriculture 4.0 est dans la place. Depuis vingt ans, les parcelles se couvrent de capteurs mesurant les précipitations, l'ensoleillement, la température, l'humidité des sols, la vitesse du vent, la pression atmosphérique, etc. Des outils connectés d'aide à la décision (OAD) se sont développés, adaptés à chaque culture et accessibles sur ordinateur ou, en plein champ, sur un smartphone. Ils intègrent plusieurs modèles météo, dont celui de Météo-France, qu'ils relient aux relevés de terrain et aux modèles de croissance des plantes (besoins à chaque stade de végétation). Ils proposent une planification fine des travaux à effectuer et des actions d'urgence à mener en cas d'alerte.

*« L'objectif est d'obtenir une météo personnalisée à 15 jours avec le plus grand niveau de confiance possible,* explique Damien Raynaud, météorologue chez Frogcast, une start-up savoyarde. *L'outil Arpege de Météo-France a une résolution de 10 kilomètres avec une prévision à J+5, Arome une résolution de 1,3 kilomètre avec une prévision à J+2 ; nous souhaitons alimenter les OAD agricoles avec des prévisions à 15 jours dotées d'une bonne fiabilité. Par exemple, une probabilité de gel à 90 %. »* Sur une vigne ou un verger, un gel en période de floraison est fatal. Les OAD offrent la possibilité d'enclencher un protocole de sauvegarde : brumisation, installation de braseros, etc. Des mesures coûteuses qui ne seront mises en œuvre que si le risque est avéré.

**VALÉRIE HANDWEILER**

# QUEL TEMPS FERA-T-IL EN 2050 ?

Sécheresses, tempêtes, déluges… Les épisodes extrêmes ont toujours existé. Mais sous l'effet du réchauffement, ils se renforcent et se multiplient. Pour les scientifiques, aucun doute : si rien n'est fait, ils constitueront à la fin du siècle la nouvelle normalité climatique.

Quel lien entre la météo du jour et le climat ? Christophe Cassou, climatologue et directeur de recherche au CNRS, répond toujours à cette question par une analogie cinématographique : *« Le climat est un film dont la météo ne serait qu'une séquence : ce n'est pas parce que vous avez vu la séquence que vous connaissez tout le scénario ! »*
Cyclones, tempêtes, vagues de froid ou canicules sont des événements météorologiques engendrés par la circulation atmosphérique sur une échelle de quelques jours. Ils sont inscrits dans un contexte climatique qui détermine leur fréquence, leur intensité et la zone spatiale dans laquelle ils se produisent. *« Il y a toujours eu des canicules sur la planète, mais leurs caractéristiques évoluent. C'est ça, le climat »,* note le chercheur.
Or le climat est déréglé. Sous l'effet des émissions de gaz à effet de serre issus de la combustion des énergies fossiles, l'atmosphère s'est globalement réchauffée de + 1,2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, au milieu du XIXe siècle. Derrière ce phénomène global existent des disparités géographiques. Les océans se réchauffent moins vite que les continents, les hautes latitudes plus vite que les basses. En France, l'écart est de + 1,8 °C. *« Chaque température de chaque jour est plus élevée qu'elle ne devrait l'être. C'est très déjà sensible. Et cela rend possibles des extrêmes beaucoup plus forts »,* explique Robert Vautard, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace et co-président du groupe 1 du Giec, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat *(lire aussi l'interview p. 51)*. Ce réchauffement chronique conduit à des situations météorologiques à l'origine de catastrophes. Ainsi, début avril 2021, une vague de froid tardive a ravagé les vignes et les arbres fruitiers du centre de la France. *« L'anomalie n'était pas tant le gel sévère d'avril, rendu moindre par l'effet du réchauffement, que les températures exceptionnellement élevées qui l'ont précédé en mars,* précise Robert Vautard. *Elles ont provoqué le débourrement des arbres et donc rendu la nature vulnérable au gel. »*
En 2022, la France a connu la troisième plus longue période de sécheresse des sols de son histoire – sur les trois quarts de son territoire. Une étude du World Weather Attribution (WWA) a montré que le principal facteur de cette sécheresse agroécologique était moins l'absence de pluies que des températures restées élevées toute l'année, qui ont provoqué une forte évapotranspiration. *« En utilisant des données issues de la modélisation de l'humidité des sols, nous avons pu montrer que cette sécheresse aurait eu trois fois moins de risque de se produire en l'absence de changement climatique »,* explique Robert Vautard.
Certains phénomènes extrêmes sont étroitement liés au réchauffement par un coefficient de proportionnalité. Depuis 1950, en France, la fréquence des canicules a ainsi été multipliée par quatre. Leur intensité est également affectée. *« Pour celles de l'été 2022 ou de septembre 2023, on a atteint des températures*

UNIVERSCIENCES

**« ON NE PEUT PAS PRÉDIRE LE TEMPS QU'IL FERA LE 1ER JANVIER 2050, MAIS ON PEUT DÉCRIRE LE DOMAINE DES POSSIBLES »**

**Christophe Cassou,** climatologue

SEBASTIEN ORTOLA/REA ; FREDERIC SCHEIBER / HANS LUCAS/AFP ; CORINNE ROZOTTE / DIVERGENCE ; PIERRE LARRIEU / HANS LUCAS/AFP

**Gel.** Des bougies protègent le vignoble de Saint-Émilion (Gironde) contre les températures négatives (7 avril 2021).
**Chaleur.** La température atteint 40 °C à Toulouse (15 juin 2022).
**Inondations.** Un village de l'Hérault fait face à un épisode cévenol (16 septembre 2023).
**Sécheresse**. Des tournesols grillent sous le soleil de Gironde (7 août 2022).

*de 40 ou 42 °C au lieu de 38 ou 40 °C sans le changement climatique. Il faut voir le changement climatique comme un dopant »*, souligne Christophe Cassou. Par ricochet, la zone nord-ouest de la Méditerranée a subi une vague de chaleur marine très longue. Sur les trois mois d'été, la température moyenne de l'eau de surface a atteint 26,1 °C. *« C'est une anomalie de + 2,6 °C par rapport à ce qu'on aurait attendu sans changement climatique, ce qui est énorme pour l'océan,* explique Thibault Guinaldo, spécialiste de l'étude satellitaire des océans au Centre national de recherches météorologiques (CNRM). *Sous l'eau, c'est un événement extrême, avec des conséquences sur le vivant. »*

### Sur la côte atlantique, l'automne dernier, six tempêtes majeures en moins d'un mois

La proportionnalité permet également de décrypter certaines caractéristiques des déluges. Il reste difficile pour les climatologues de déterminer l'impact du réchauffement sur la fréquence des tempêtes ou des épisodes cévenols, comme en septembre 2023, dans le nord de l'Hérault, ou quelques semaines plus tard sur la façade atlantique, balayée par une succession de tempêtes : Aline, Babet, Ciaran, Domingos, Elisa et Frederico. En revanche, les pluies que ces épisodes déversent obéissent à une loi physique qui détermine la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère à une température donnée : pour chaque degré de réchauffement de l'air, l'atmosphère peut contenir 7 % de vapeur d'eau supplémentaire. *« Les observations actuelles vérifient cette loi : les fronts nuageux sont plus chargés en vapeur d'eau précipitable, ce qui explique les pluies intenses. C'est encore le principe du dopage »*, souligne Christophe Cassou.
Peut-on prévoir la météo du futur ? *« C'est exactement notre but lorsque nous faisons tourner des modèles climatiques en fonction des différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre*, poursuit le climatologue. *On ne peut pas dire quel temps il fera le 1er janvier 2050, mais on peut décrire le domaine* ◆◆◆

◆◆◆ *des possibles.* » Ainsi, dans le scénario tendanciel, c'est-à-dire aligné sur les promesses de réduction des émissions de gaz à effet de serre et les politiques publiques mises en place, le réchauffement global à la fin du siècle sera de l'ordre de +3 °C par rapport à l'ère préindustrielle. La traduction régionale pour la France s'établira à + 4 °C. Et la traduction saisonnière de ce réchauffement régional atteindra + 5,3 °C en été. *« À la fin du siècle,* reprend Christophe Cassou, *chaque été en France aura trois chances sur quatre d'être plus chaud que l'été 2022… qui apparaîtra rétrospectivement comme un été frais. Un été chaud, dans ce climat-là, sera autour de + 7 °C en moyenne entre juin et août, et il est très probable que le seuil de 50 °C sera franchi quelque part en métropole, sans que l'on puisse encore dire où. On ne connaît pas la temporalité des futurs météorologiques, mais on connaît leur statistique. C'est une traduction du réchauffement global en entités météorologiques locales que sont les canicules. »*

La météo des mers n'échappera pas à cette règle. En 2022, au large de Marseille, quatre vagues de chaleur marine se sont succédé entre avril et août, avec un pic à + 5 °C au-delà de la température attendue sans réchauffement. *« Un tel phénomène sera la norme dans le climat de 2050. Il faut imaginer, d'ici vingt ans, des canicules marines en Méditerranée qui pourront être deux à trois fois plus longues, 30 % plus étendues et de 1 °C plus intenses à leur pic qu'à la fin du XXe siècle. Mais si les émissions se poursuivent au rythme actuel, elles pourraient, à la fin du siècle, être présentes tous les ans, démarrer en juin et finir en octobre, être de 3 à 4 °C plus intenses, s'étendre sur l'ensemble de la mer Méditerranée et l'ensemble de l'été »*, analyse Samuel Somot, chercheur en modélisation climatique en Méditerranée au CNRM.

MÉTÉO FRANCE

**« À LA FIN DU SIÈCLE, LES VAGUES DE CHALEUR MARINE POURRAIENT DÉMARRER CHAQUE ANNÉE EN JUIN ET FINIR EN OCTOBRE, ET S'ÉTENDRE À TOUTE LA MER MÉDITERRANÉE »**

**Samuel Somot,** chercheur au CNRM

### D'ici à 2050, le niveau de la mer devrait augmenter de 30 centimètres environ

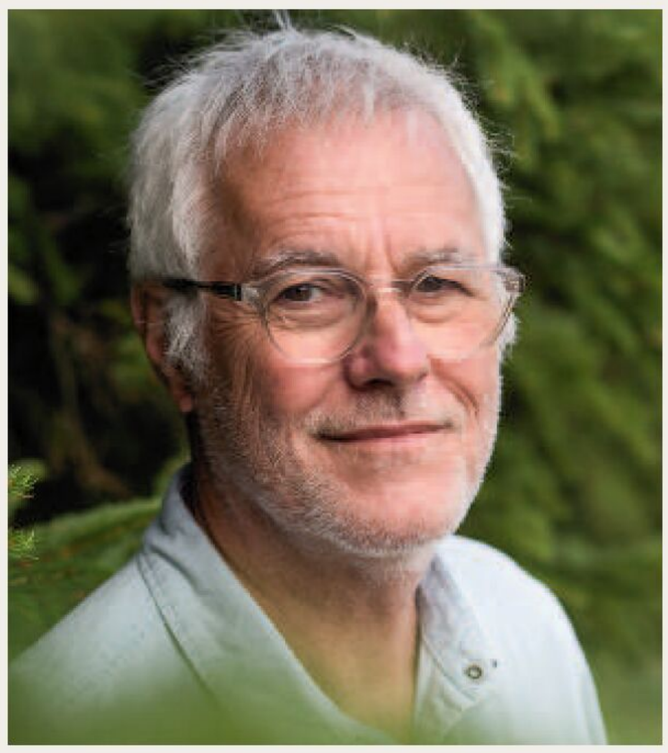
Même logique pour le risque de submersion marine. Le niveau de la mer s'est élevé de 20 centimètres par rapport au début du XXe siècle, par apport de la fonte des glaces continentales et par dilatation de l'eau. Quand une tempête passe, la diminution de la pression atmosphérique fait provisoirement augmenter le niveau de la mer, à raison de 1 centimètre de plus par hectopascal en moins dans l'atmosphère. Ce phénomène temporaire vient s'ajouter au phénomène chronique. Lors de la tempête Xynthia, en février 2010, sur le littoral de Vendée et de Charente, la surcote a dépassé 4 mètres de hauteur. Dans le climat de 2010, la probabilité d'un tel événement était de 1 sur 200. Projetons-nous à présent dans la période 2050-2060, où le niveau de la mer aura encore augmenté de 30 centimètres environ. *« Sous l'effet de la hausse chronique, la probabilité que ce type d'aléa survienne passe à 1 sur 50: il devient quatre fois plus probable. À la fin du siècle, avec une hausse du niveau de la mer autour de 90 centimètres à 1 mètre, il passe à une chance sur deux, il devient normal. »* Mais il n'y a pas de fatalité. En 2023, la mairie de Paris a demandé à Robert Vautard si, dans les prochaines décennies, la capitale pourrait subir une canicule défiant le code couleur des cartes estivales et atteignant 50 °C, comme ce fut le cas en Colombie-Britannique (Canada) pendant l'été 2021. C'est possible, a répondu le chercheur, qui pointe un résultat intéressant: *« 50 °C à Paris reste très peu probable dans les simulations climatiques, tant que le réchauffement global reste inférieur à 2 °C. Si les pays acceptent de collaborer pour diminuer drastiquement les émissions, le scénario peut changer. »* Le bulletin météo du 1er août 2100 n'est pas encore écrit. **CÉCILE CAZENAVE**

## Le système Terre au cœur des modèles

**Les différents scénarios du réchauffement climatique, qui figurent notamment dans les rapports du Giec, sont le fruit de modèles *(lire p. 35-37)*. Mais la « maille » (le degré de précision d'un modèle) qu'ils utilisent est bien plus grande que celle des modèles météo dont ils dérivent: 100 kilomètres de côté. Ils incluent aussi beaucoup plus de phénomènes: les interactions de l'atmosphère avec l'océan, les glaces de mer, le manteau neigeux… et même les rivières, le couvert végétal, le cycle du carbone – dont les micro-organismes des océans, qui jouent le rôle de pompe à carbone. Autrement dit: le système Terre. Autre différence avec la météo: pas besoin de partir d'un état initial pour prédire des trajectoires climatiques. Enfin, les modèles climatiques incluent les « forçages »: des événements naturels imprévus (éruptions, etc.), mais aussi l'influence humaine, avec notamment les émissions de $CO_2$, basée sur les projections des économistes et démographes.** **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**

**ROBERT VAUTARD**
Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace et co-président du groupe 1 du Giec

# « Des épisodes caniculaires plus chauds de 4 °C »


PABLO CHIGNARD / DIVERGENCE

Le lien entre phénomènes météorologiques extrêmes et changement climatique est désormais scientifiquement établi.

**Depuis quand les scientifiques peuvent-ils certifier que le changement climatique a une influence sur la météo du quotidien ?**
L'idée en revient au professeur de géosciences Myles Allen, de l'université d'Oxford, qui a publié début 2003 l'article fondateur de ce qu'on appelle la science de l'attribution : il s'agit de rechercher quelle est la probabilité qu'un événement météorologique soit lié au changement climatique. Avec son collègue Peter Stott, Myles Allen a appliqué ses intuitions à la canicule de l'été 2003 et émis l'hypothèse que les records de chaleur enregistrés alors n'auraient pas été aussi élevés sans les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Ses arguments étaient convaincants, mais il a fallu dix années de plus pour que la science de l'attribution émerge. Car dans la première décennie du XXIe siècle, la hausse des températures était trop faible pour avoir un impact marqué, et le changement climatique restait une notion abstraite pour le commun des mortels.

**Selon vous, quel événement météo a marqué le début de cette toute nouvelle science ?**
Le premier à avoir été attribué « en temps réel » est la vague de chaleur de juillet 2015, alors que la communauté des climatologues commençait à s'organiser et créait un réseau scientifique, le World Weather Attribution. Et puis, il y a eu les vagues de chaleur de 2019 en Europe, qui ont donné le record de la température la plus élevée jamais enregistrée en France – 45,9 °C le 28 juin à Vérargues, dans l'Hérault : c'était le signal évident que le changement climatique affectait la météo. L'étude réalisée alors a consisté à éplucher les statistiques météo jusqu'au début du XXe siècle pour retrouver des vagues de chaleur similaires sur plusieurs territoires d'étude : la France, notamment la ville de Toulouse, et d'autres stations d'Europe de l'Ouest. Elle a montré que sans le réchauffement climatique, les températures maximales de cet épisode caniculaire auraient été inférieures de 4 °C.

**Quels sont les outils employés par les chercheurs ?**
D'abord, les observations physiques, notamment les enregistrements de températures et de précipitations. Et quatre décennies d'observations par satellite, qui nous donnent un historique du fonctionnement chaotique de notre atmosphère, étayé par une connaissance toujours plus fine des mécanismes physiques à l'origine des dépressions ou des anticyclones.
Les modèles numériques constituent la deuxième ressource. Ils sont de plus en plus puissants, et connectés à l'échelle européenne, ce qui permet de comparer une multitude de scénarios suivant les teneurs en gaz à effet de serre. On peut ainsi débusquer les différences d'impact entre une atmosphère à 280 ppm (parties par million) de $CO_2$ qui prévalait en 1850, à l'orée de l'ère industrielle, et celle d'aujourd'hui, à 419 ppm.
Le troisième outil, enfin, ce sont les études statistiques et les calculs de probabilité, qui révèlent l'évolution de la fréquence et de l'intensité des événements météo.

**Cette science de l'attribution peut-elle servir à demander réparation devant les tribunaux aux émetteurs historiques de gaz à effet de serre ?**
C'est aller un peu vite en besogne ! Il y a au moins deux obstacles. D'abord, l'attribution ne peut se faire que dans des régions possédant des séries temporelles de températures et de précipitations. Or, la plupart des pays affectés sont pauvres, ils n'ont pas cet historique.
Autre réserve : les pertes et dommages ne dépendent pas seulement de l'intensité de l'événement météo. Artificialisation des sols, aménagements urbains, faiblesse des infrastructures… Les politiques locales et l'histoire du pays jouent tout autant.

**PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC CHAUVEAU**

# Le fascinant spectacle des éléments déchaînés

Ouragans, tornades, tempêtes de sable… Des phénomènes parfois apocalyptiques… mais souvent très photogéniques. Voici de quoi les admirer sans risques.

Pages réalisées par Nicolas Gutierrez C.

## ▲ SPIRALE INFERNALE

Fréquentes en Australie et en Amérique du Nord (ici au Texas), les tornades se forment à la base d'un cumulonimbus lors d'orages violents. L'air chaud et humide est aspiré par le nuage qui entre en rotation sous l'effet de vents pouvant souffler jusqu'à 400 km/h. D'un diamètre de quelques centaines de mètres, la colonne d'air tourbillonnant qui descend jusqu'au sol progresse à environ 100 km/h.

COVER IMAGES/ABACA

NICOLAS BOUCHEX

WARREN FAIDLEY/GETTY IMAGES

**▲ COUPS DE FOUDRE**

Lors d'un orage, comme ici, sur la ville d'Ugine (Savoie), peuvent se produire des éclairs, décharges électriques qui se propagent jusqu'à la terre le long de canaux conducteurs. Après avoir percuté le sol, le courant de retour peut échauffer le canal jusqu'à 30 000 °C. L'air se dilate brutalement, provoquant une onde de choc : le tonnerre.

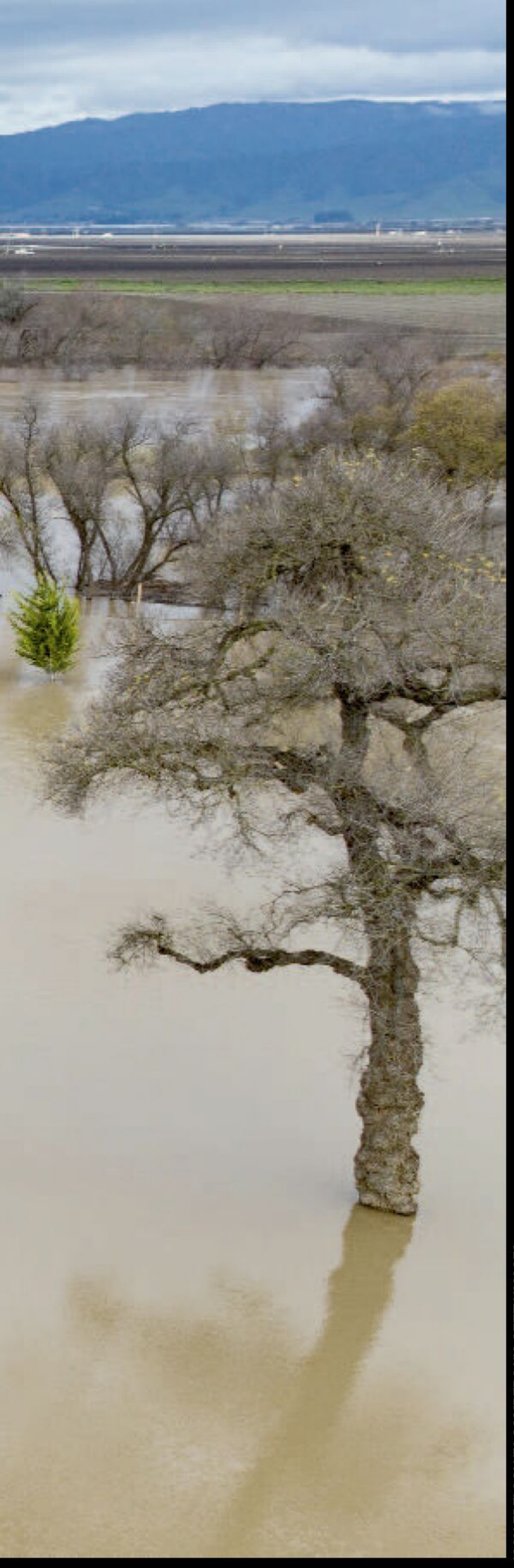
**◀ COMME UN OURAGAN…**

Appelés typhons en Asie, cyclones dans le Pacifique Sud et l'océan Indien, les ouragans (ici Irma, en Floride, en 2017) tirent leur force des eaux tropicales chaudes au-dessus desquelles s'élève de l'air très humide. Autour d'une zone calme, l'œil, s'enroulent des vents soufflant à plus de 120 km/h accompagnés de fortes pluies, causant des dégâts matériels souvent considérables.

### ▶ LA NUIT EN PLEIN JOUR

Impressionnantes, les tempêtes de sable peuvent plonger de vastes zones dans un épais brouillard ocre pendant plusieurs jours. Sable et poussière sont soulevés jusqu'à plusieurs kilomètres, formant un mur poussé par des vents puissants. Si ces tempêtes sont fréquentes aux abords des déserts (ici au Niger), les particules en suspension sont parfois soufflées sur des milliers de kilomètres.

TOM PILSTON/PANOS-REA



JOSH EDELSON/BLOOMBERG VIA GETTY IMAGES

**▲ ENTRE DEUX EAUX**

À l'origine des pluies diluviennes qui ont noyé la Californie en janvier 2023 : une rivière atmosphérique, flux d'humidité concentrée serpentant sur des milliers de kilomètres dans la partie basse de l'atmosphère. Ce phénomène n'est pas nouveau, mais son intensité est exacerbée par le réchauffement global.

**▶ QUEL PANACHE !**

Identifiables à leur forme de soucoupe, les nuages lenticulaires ou altocumulus lenticularis coiffent les cimes. Ils sont façonnés par l'ondulation de flux d'air humides sous l'effet de vents forts. Stationnaires, ils ne donnent pas de précipitations… mais annoncent la tempête.

B. GOLDMAN/GETTY IMAGES

ORBON ALIJA/GETTY IMAGES

### ▲ PARIS… SAUPOUDRÉE !

Les hivers parisiens ressembleront-ils encore à cette photo ? Rien n'est moins sûr. Les épisodes neigeux sont de plus en plus rares (7 jours en moyenne par an) dans la capitale. L'hiver 2013-2014 fut le premier sans neige… Loin du record de mars 1946 : 40 centimètres mesurés intra muros.

### ▶ SOUS LES PALMIERS, LA NEIGE

Les 28 février et 1er mars 2018, le département de l'Hérault a connu un épisode neigeux exceptionnel au terme d'une vague de froid intense, avec localement plus de 30 centimètres. Ici la plage de Carnon, soudainement propice au ski de fond.

© 2018 DERDOUR RACHID/SHUTTERSTOCK

### ◀ BLANCHEUR ÉPHÉMÈRE

Les déserts chauds se rafraîchissent brutalement la nuit, le sable conservant très mal la chaleur. L'hiver, ils peuvent même se couvrir d'un mince voile blanc. C'est le cas au nord du Sahara – ici vers Aïn Sefra (Algérie) – où se croisent l'air humide de l'Atlantique et celui de la Méditerranée. Il en résulte des précipitations importantes : pluie… ou neige si l'air est assez froid, comme ce fut le cas en 2018.

FABIEN BRUMARD

# L'AVENIR AVEC LE CLIMAT

## SON TEMPS

Elle a changé le sort des armées de Napoléon, elle influence notre santé, nous donne vague à l'âme ou bonne humeur... La météo n'est pas qu'affaire de spécialistes du calcul. Le temps qu'il fait est une préoccupation quotidienne et intime : d'ailleurs, nous ne cessons d'en parler !

SEAN GLADWELL / GETTY IMGES

# D'ÂGE EN ÂGE, UN TRÉSOR D'OBSERVATIONS

La météorologie est fille d'Aristote qui, le premier, a expliqué les phénomènes célestes en écartant toute intervention divine. Mais prévoir est encore autre chose… Pendant des millénaires, les humains ont recouru à l'observation patiente et assidue de la nature.

Fera-t-il beau demain ? Une question peut-être aussi vieille que l'humanité… Mais l'avènement de la météorologie comme science est relativement récent dans l'histoire humaine. Alors, comment s'y prenait-on par le passé pour prédire la pluie et le beau temps ?

En Occident, les premières traces écrites remontent à l'Antiquité. C'est Aristote (384-322 av. J.-C.) qui invente d'ailleurs le terme, lorsqu'il rédige son traité *Meteorologica*, aux alentours de l'an 340 avant notre ère. *« Il est toutefois important de faire une distinction de terminologie*, pointe Frédéric Le Blay, spécialiste en histoire des sciences et philosophie ancienne à l'université de Nantes. *Quand Aristote définit ce champ théorique pour la première fois, il s'intéresse à l'ensemble des phénomènes observables dans la partie "sublunaire" du monde. »* En effet, le cosmos aristotélicien se divise en deux espaces. Le premier, au-dessus de la Lune ou « supralunaire », est celui, prévisible et régulier, des astres et de leurs révolutions sphériques autour de la Terre, celui de l'astronomie ou de l'astrologie. Le second, appelé donc « sublunaire », est irrégulier et imprévisible, régi par l'interaction des quatre éléments (feu, air, eau, terre) et de leurs qualités (chaud, froid, sec, humide). C'est la sphère des météores, à savoir les phénomènes célestes, comme les étoiles filantes ; atmosphériques, comme la pluie, le vent, les éclairs ; et terrestres, avec le mouvement des eaux ou encore les séismes. Il s'agit donc, en quelque sorte, d'un champ beaucoup plus vaste que celui de la météorologie moderne : des « sciences de la Terre » précoces, saupoudrées de théories portant sur les transformations de la matière qui se produisent lorsqu'exhalaisons sèches et humides se rencontrent et réagissent… La foudre, par exemple, est pour Aristote le résultat d'une réaction violente survenant lorsqu'une exhalaison sèche issue de la sphère tellurique s'élève dans le ciel, engendrant une réaction d'inflammation avec la matière froide des nuages dans la sphère aérienne. Les conceptions du philosophe

CHRISTIAN CHAUVET

**« LA LECTURE DES SIGNES VENUS DU CIEL EST UNE ACTIVITÉ CENTRALE DES POPULATIONS DE LA MÉDITERRANÉE ANTIQUE »**

**Frédéric Le Blay,** spécialiste en histoire des sciences et philosophie ancienne, université de Nantes

**Zeus brandissant le foudre.** Les Grecs attribuaient au dieu suprême certaines manifestations atmosphériques (détail d'une amphore, Ve siècle av. J.-C., musée du Louvre).

THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM DISTRIBUTION GRAND PALAIS/RMN

et savant survivront à leur auteur et poseront le socle de la compréhension – erronée – du monde par les Occidentaux pendant près de deux millénaires, notamment durant le Moyen Âge *(lire l'encadré p. 62)*.

Cette volonté d'expliquer les phénomènes météorologiques n'est cependant pas l'apanage de la philosophie grecque. Les Upanishad, une série de textes védiques composés en Inde tout au long du premier millénaire avant notre ère, contiennent des discussions sur la façon dont se forment les nuages – notamment sur le rôle de la chaleur du soleil dans l'évaporation de l'eau –, la pluie et les cycles saisonniers. Plus à l'est, l'astronome chinois Wang Chong (27-97) théorise que la pluie provient d'eau évaporée sur terre, et non des cieux comme le voulait la mythologie chinoise.

## La météo, souci des paysans, des marins… et des militaires

Mais comprendre ne signifie pas prévoir. Il faut donc différencier la météorologie, qui consiste à observer les phénomènes atmosphériques et à décrire leurs causes et processus, de sa contrepartie prédictive, par laquelle on anticipe le temps qu'il fera dans un futur proche. « *Les premiers textes connus relatant cet effort de prédiction proviennent de Mésopotamie*, note Frédéric Le Blay. *Les tablettes cunéiformes traitant de ce sujet sont assujetties à une formulation systématique particulière : si se produit le phénomène A, cela annonce le phénomène B.* » Une logique qui se retrouve plus tard dans *Les Signes du temps*, du philosophe grec Théophraste (372-288 av. J.-C.), l'un des premiers textes pleinement dédiés à la prédiction de la météo de manière pratique. Un exemple qui témoigne de la forte influence de l'enseignement des astrologues babyloniens sur la pensée astronomique et météorologique grecque.

Mais à qui ces prédictions servaient-elles vraiment ? D'après l'helléniste Michel Casevitz, « *il n'y avait pas à proprement parler de préoccupation pure d'ordre météorologique en Grèce ancienne* ». Connaître le temps qu'il va faire est d'abord le souci des paysans, des marins, des voyageurs… et des militaires. Les textes de prédiction, comme celui de Théophraste, ou encore la dernière partie du poème *Phé-* ◆◆◆

◆◆◆ *nomènes* d'Aratos (315-245 av. J.-C.), se fondent ainsi principalement sur un savoir populaire, issu de la culture commune des gens de la mer et de la campagne, bâti sur des observations transmises de génération en génération, probablement depuis l'avènement des sociétés pastorales et agricoles, au néolithique.

### Le croassement des corbeaux, le soir, annonce un lendemain radieux

Parmi ces observations, celles du comportement des animaux jouent un rôle majeur dans la prévision des changements à moyen et long terme, et les oiseaux y ont la part belle ! Le chant du coucou et le retour de l'hirondelle indiquent l'arrivée du printemps. Le cri de la grue, lorsqu'elle migre vers le sud, annonce la saison froide – et si son départ a lieu en masse et de manière précipitée, cela signifie que l'hiver sera précoce. Ces connexions logiques – qui illustrent la systématisation entre phénomènes A et B observée sur les tablettes mésopotamiennes – entrent aussi en jeu à court terme ; des hirondelles au ras de l'eau, des hérons volant en criant vers la mer annoncent la pluie ; des moineaux piaillant un soir d'hiver, le vent ; et des corbeaux croassant à qui mieux mieux au crépuscule, un radieux lendemain… Les Grecs sont aussi à l'écoute d'autres animaux : lorsque les abeilles restent dans leur ruche et que les animaux domestiques s'agitent, la tempête est proche… Pour Germaine Aujac, spécialiste de la Grèce antique, les individus au contact direct de la nature, et qui ont besoin de prévoir son évolution, *« accordent à des êtres, souvent considérés comme dénués de raison, une intuition naturelle supérieure à celle des humains »*.

**Joëlle Ducos,** *La Météorologie en français au Moyen Âge*, Honoré Champion, 2000

**Christophe Cusset,** *La Météorologie dans l'Antiquité entre science et croyance,* Publications de l'université de Saint-Étienne, 2003

**La Marche de l'histoire, émission radio de Jean Lebrun,** « Aux origines de la météorologie », France Inter, 26 août 2013, sciav.fr/Intermeteo

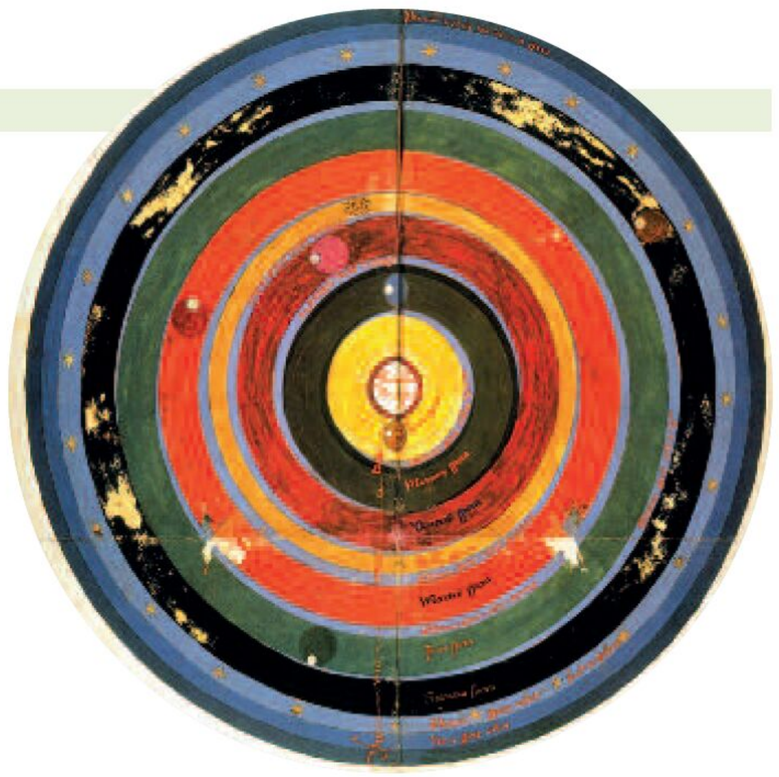
### Des calendriers de pierre à trous, mis à jour au moyen de chevilles de bois

Le ciel, bien sûr, est tout aussi chargé d'indices météorologiques. Ainsi, dans *Les Signes du temps*, Théophraste note qu'un ciel rouge à l'aube ou au couchant est associé à la survenue de la pluie dans les trois jours, tandis qu'en hiver, un ciel pâle le soir est signe de beau temps pour le lendemain. La Lune et le Soleil, selon qu'ils sont voilés ou cernés d'un halo, donnent aussi des indications de vent et de pluie, et les agriculteurs se servent de la position des étoiles pour suivre le passage des saisons ou savoir quand semer.

Pour canaliser toutes ces connaissances et servir les besoins du monde agricole, des astro-

## L'astrométéorologie, une passion médiévale

**Tout au long du Moyen Âge, des savants influencés par la conception aristotélicienne du monde et les tables des mouvements planétaires de l'astronome et mathématicien grec Ptolémée (100-168) ont développé une nouvelle façon de prévoir les changements saisonniers : l'astrométéorologie. C'est au Proche-Orient qu'en sont posées les bases par le philosophe Al-Kindi (801-873). Pour lui, les phénomènes météorologiques sont déterminés par les mouvements, la position, la distance à la Terre et les qualités spécifiques des planètes (taille, couleur). En calculant ces données, et en connaissant l'association des planètes avec les divers éléments sublunaires, il était selon lui possible de mettre au point des prévisions. Saturne, par exemple, était perçue comme lente et lointaine et liée aux qualités froides et sèches de la Terre : la proximité entre les deux planètes pouvait s'interpréter comme annonciatrice d'un temps froid et sec. Ces traités d'astrométéorologie rencontrent un certain succès dans le monde islamique, jusqu'à attirer l'attention des États chrétiens, qui commencent à les traduire et à les étudier dès les XI^e^ et XII^e^ siècles. À cette époque, le développement des centres urbains stimule le commerce à longue distance. Les marchands veulent s'assurer de conditions optimales pour acheminer leurs cargaisons et répondre aux besoins croissants en ravitaillement des villes. Il devient impératif de connaître le temps qu'il fera, et les « pronostications » sont donc de plus en plus demandées. L'astrométéorologie atteint le paroxysme de sa popularité À la Renaissance, avant d'être totalement discréditée par l'avènement de la science météorologique moderne.**



THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES

**La vision ptoléméenne du cosmos** a servi de base à une explication originale des événements météo, selon la position et les qualités des planètes. Dessin de Johann Tolhopf, XV^e^ siècle.

**Le mois de janvier.** Détail d'une fresque représentant les douze mois de l'année (probablement maître Wenceslas, vers 1400, château du Bon-Conseil, Trente, Italie).

PHOTO12/ALAMY/SCIENCE HISTORY IMAGES

nomes grecs de renom, comme Démocrite d'Abdère (460-370 av. J.-C.), auraient rédigé des calendriers similaires à nos anciens almanachs. Gravés sur pierre et fixés sur un support bien visible, connus sous le nom de parapegmes, ils pouvaient être perpétuellement mis à jour au moyen de chevilles de bois à fixer dans des trous prévus à cet effet. De telles installations, datées du IIe siècle avant notre ère, ont notamment été retrouvées à Milet, ancienne cité grecque d'Asie Mineure. Elles informaient la population des principaux événements astronomiques et des prévisions météorologiques associées. Une pratique également retrouvée chez les Romains, où ces calendriers servaient à rythmer la vie hebdomadaire, donnant des indications pour les semailles et les moissons, mais aussi les jours de marché, par exemple.

*« La lecture des signes venus du ciel, et plus généralement de tous les signes associés à leur environnement naturel, est une activité centrale des populations de la Méditerranée antique et elle s'intègre souvent dans le cadre de la religion et de la superstition*, explique Frédéric Le Blay. *Les civilisations grecque et romaine sont sémiologiques : tout phénomène est susceptible de faire signe et de recevoir une interprétation. »* La volonté de comprendre « scientifiquement » les phénomènes célestes ne s'inscrit pas en opposition avec le champ religieux. En effet, lorsqu'ils interprètent rationnellement les étoiles filantes ou la foudre, les auteurs savants comme Aristote ne remettent pas en question l'ordre divin qui gouverne ces phénomènes météorologiques, mais plutôt se distancient des fables mythologiques qui les associent parfois à une intervention divine. L'effort d'explication du monde et de ses mécanismes s'inscrit donc comme une volonté de se libérer des superstitions et se fonde sur une certaine sagesse populaire, distillat de siècles d'observations, et qui permettait de mieux se préparer aux conditions du lendemain.

**WILLIAM ROWE-PIRRA**

**La raison des dictons**

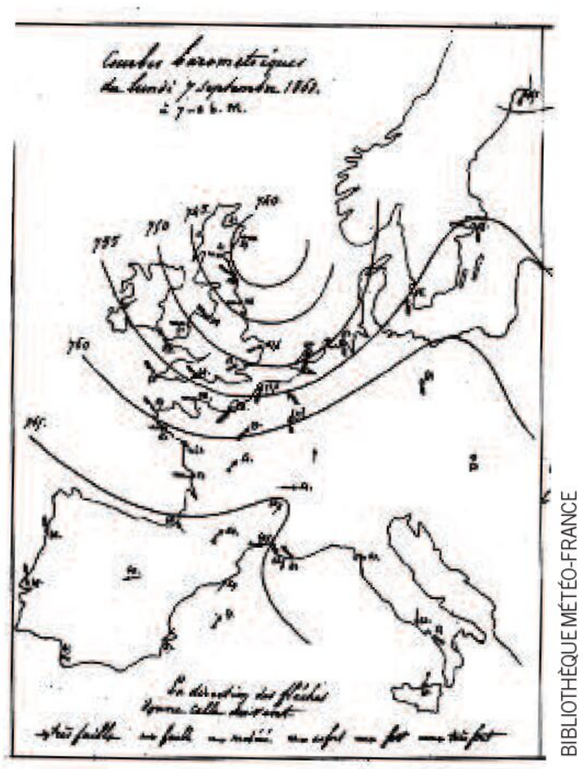
### Rouge le soir et blanc le matin, bons quarts pour le marin

L'un des dictons qui se vérifient le plus souvent… L'évangile de Matthieu (16-1) le disait déjà : *« Au crépuscule, vous dites : il va faire beau temps, car le ciel est rouge feu ; et à l'aurore, mauvais temps aujourd'hui, car le ciel est d'un rouge sombre… »* La couleur du ciel naît des interactions de la lumière avec les molécules et les poussières de l'atmosphère : quand le soleil est bas sur l'horizon, sa lumière traverse une plus grande épaisseur d'atmosphère, les courtes longueurs d'onde (violet, bleu) ne nous parviennent plus, au contraire des plus grandes (orange, rouge). Ce d'autant plus que la pression est élevée. Rouge le soir indique que les hautes pressions sont au couchant. Les masses d'air se déplaçant souvent d'ouest en est à nos latitudes, c'est qu'elles se dirigent vers nous. Si le ciel est rouge le matin, les hautes pressions se trouvent à l'est, un air à plus basse pression arrive de l'ouest : le temps va changer ! **D.Dq**

# LE TEMPS GLORIEUX DES PIONNIERS

La prévision météorologique a acquis ses lettres de noblesse au XIXe siècle. Grâce à des méthodes de mesure et d'observation inédites, à l'utilisation du télégraphe pour centraliser et diffuser les données… et à l'obstination d'un homme : Urbain Le Verrier.

La météorologie moderne a émergé d'un naufrage. Dans la nuit du 13 au 14 novembre 1854, une tempête s'abat sur la mer Noire, au large de la Crimée, théâtre de la guerre qui oppose alors à la Russie une coalition de quatre puissances, dont la France. À quelques encablures du port de Sébastopol, la flotte des alliés est dévastée : 41 navires sont perdus, 400 marins périssent. Aurait-on pu prévoir le phénomène et éviter le désastre ? À la tête de l'Observatoire de Paris depuis janvier 1854, Urbain Le Verrier en est convaincu. L'astronome, célèbre pour avoir découvert la planète Neptune, va s'employer à le démontrer à l'empereur Napoléon III. Le Verrier recueille les informations météorologiques des observatoires européens pour la période précédant le 14 novembre, et constate que la tempête était déjà présente au nord-ouest de l'Europe le 12 novembre, puis qu'elle s'est déplacée en direction du sud-est. Si la marine de guerre avait pu mettre la main sur ces informations à temps, en recourant aux réseaux télégraphiques, la flotte française aurait sans doute évité la catastrophe.


BIBLIOTHÈQUE MÉTÉO-FRANCE

**La première carte barométrique française,** établie en 1863 par Le Verrier et Marié-Davy et publiée dans le *Bulletin de l'Observatoire impérial.*

Adepte des nouveaux moyens de communication, Le Verrier saute sur l'occasion. Il propose à l'empereur de créer, via le télégraphe, un réseau européen d'observations météorologiques, centralisé à Paris, afin d'anticiper les tempêtes. Approuvée par Napoléon III, la structure se déploie rapidement, d'abord en France. Vers 1860, le pays compte une douzaine de postes. Chaque matin, à 7 heures, les agents du télégraphe y relèvent les mesures de cinq instruments : thermomètre, hygromètre, anémomètre, pluviomètre et baromètre. Ils télégraphient ces informations avec leur première dépêche du jour à l'Observatoire de Paris. Dans le même temps, Le Verrier négocie avec succès un échange de données avec les grands observatoires européens. Fin 1860, le réseau fédère dix-neuf stations étrangères. Chaque jour, Paris publie son Bulletin, avec les données pour la France et les grandes villes européennes, de Lisbonne à Moscou. Celui-ci est communiqué dans la journée aux autorités ministérielles et à la presse, qui se montre friande de ce nouveau type d'actualités. Mais, pour l'heure, il ne fournit que des observations. *« Or, c'est un service de prévision* ◆◆◆

**La raison des dictons**

### “ Quand le carillon des cloches s'entend de loin, c'est signe que le temps va changer

À la campagne, le météorologue amateur doit avoir les oreilles bien ouvertes. Imaginez que dans une matinée jusque-là silencieuse, vous commenciez à entendre des trains passant sur une voie plus à l'est, à quelques kilomètres. C'est probablement le signe que le vent vient désormais de là, apportant en général du beau temps. Quand des sons proviennent soudain de l'ouest, le carillon d'une église par exemple, attendez-vous à une dégradation : soit le vent est passé à l'ouest, soit un air plus humide est en route, qui propage mieux les sons. Attention, c'est l'inverse près de la Méditerranée ! Et ailleurs en hiver, les sons qui portent loin sont signe d'un air plus dense, et donc de beau temps.

BIBLIOTHÈQUE MÉTÉO FRANCE

**« Capitale » de la météorologie européenne** dans la deuxième moitié du XIXe siècle, Paris comptait plusieurs stations. Comme son homologue du parc Montsouris (installée en 1872), celle des Buttes-Chaumont bénéficiait d'un large espace propice aux mesures.

## La tour Eiffel, observatoire idéal

**Un *laboratoire tel qu'il n'en aura jamais été mis d'analogue à la disposition de la science.* » Tel est le projet qu'imagine Gustave Eiffel (1832-1923) pour sauver sa Dame de fer de la démolition qui l'attend en 1909, à la fin du contrat le liant à la Ville de Paris et à l'État. Dès l'inauguration, pour l'Exposition universelle de 1889, l'ingénieur avait installé à son sommet une station météo enregistrant des mesures de température, pression, hygrométrie, précipitations et vitesse du vent. Trente ans plus tard, à partir de novembre 1920, la tour diffuse des bulletins météo, d'abord en morse – via la télégraphie sans fil – puis sur les ondes de Radio Tour Eiffel, lancée en 1922. Si celle-ci a cessé d'émettre en juin 1940, l'observatoire météo existe toujours ! Mais la tour fut également un laboratoire d'un autre genre : Eiffel s'y adonne en effet dès 1903 à des expériences d'aérodynamique. En 1909, il y installe une soufflerie où se pressent des aviateurs de renom, comme Louis Blériot, pour tester leurs maquettes d'engins volants. La tour est par ailleurs taillée pour supporter les intempéries. Sa structure métallique protectrice lui permet de résister à la foudre… que pourtant elle attire : avec ses 330 mètres de hauteur, elle constitue le point le plus élevé de Paris… et son plus grand paratonnerre !**

**LAUREEN BOUYSSOU**

**Catherine Orsenne,** *Paris et sa tour Eiffel*, Massin, 2017

◆◆◆ *météorologique que souhaite développer Le Verrier* », souligne Fabien Locher, historien de l'environnement au CNRS.

Mais comment s'y prendre ? Les ingrédients de base sont déjà là. Il y a d'abord les cinq instruments déjà évoqués, mis au point progressivement à compter du XVe siècle et qui n'ont cessé depuis d'être améliorés. Le concept de réseau d'observation est apparu, quant à lui, dès le XVIIe siècle : en Italie, le grand-duc de Toscane Ferdinand II équipe onze villes en baromètres et thermomètres vers 1665 ; deux autres réseaux sont créés en Europe à la fin du XVIIIe siècle, l'un en France, organisé par l'abbé Louis Cotte (63 stations dans le monde entier) pour observer les liens entre maladies et climat, l'autre en Allemagne à partir de Mannheim (57 stations). Au XIXe siècle, le télégraphe va changer la donne. En 1849, James Glaisher, astronome à l'Observatoire de Greenwich, organise un service d'observation dans une trentaine de gares anglaises. Les données sont télégraphiées à la rédaction du *Daily News*, qui les publie dans son édition du soir. La même année, aux États-Unis, le télégraphe est utilisé pour tenter de suivre le déplacement des tornades.

**Découvreur de Neptune,** l'astronome français Urbain Le Verrier (1811-1877) a mis toute sa conviction et son audace au service d'une nouvelle science, la météorologie.

BRIDGEMAN IMAGES

Mais l'idée que l'on puisse prévoir scientifiquement le temps soulève autant d'espoirs que de polémiques : sur quelles bases théoriques s'appuyer ? L'influence potentielle des astres sur la météo *(lire p. 62)* fait toujours débat. Vers la fin du XVIIIe siècle, le physicien français Antoine de Lavoisier affirme qu'avec des données mesurées quotidiennement (pression, force et direction du vent, humidité de l'air), on pourra presque toujours prévoir le temps un jour ou deux à l'avance. Mais le naturaliste Jean-Baptiste de Lamarck se ridiculise avec son *Annuaire météorologique* annuel – publié de 1799 à 1810 – qui comprend des « probabilités » sur le temps à venir, élaborées à partir d'une théorie de l'influence de la Lune sur l'atmosphère. On compare son ouvrage à un almanach, ses prédictions à celles de Nostradamus. En 1846, l'astronome François Arago, qui a précédé Le Verrier à la tête de l'Observatoire de Paris, en vient même à écrire dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* : « *Jamais, quels que puissent être les progrès des sciences, les savants de bonne foi et soucieux de leur réputation ne se hasarderont à prédire le temps.* » Plutôt la prudence que déconsidérer la science !

### La simple observation des cartes permit de découvrir… les dépressions

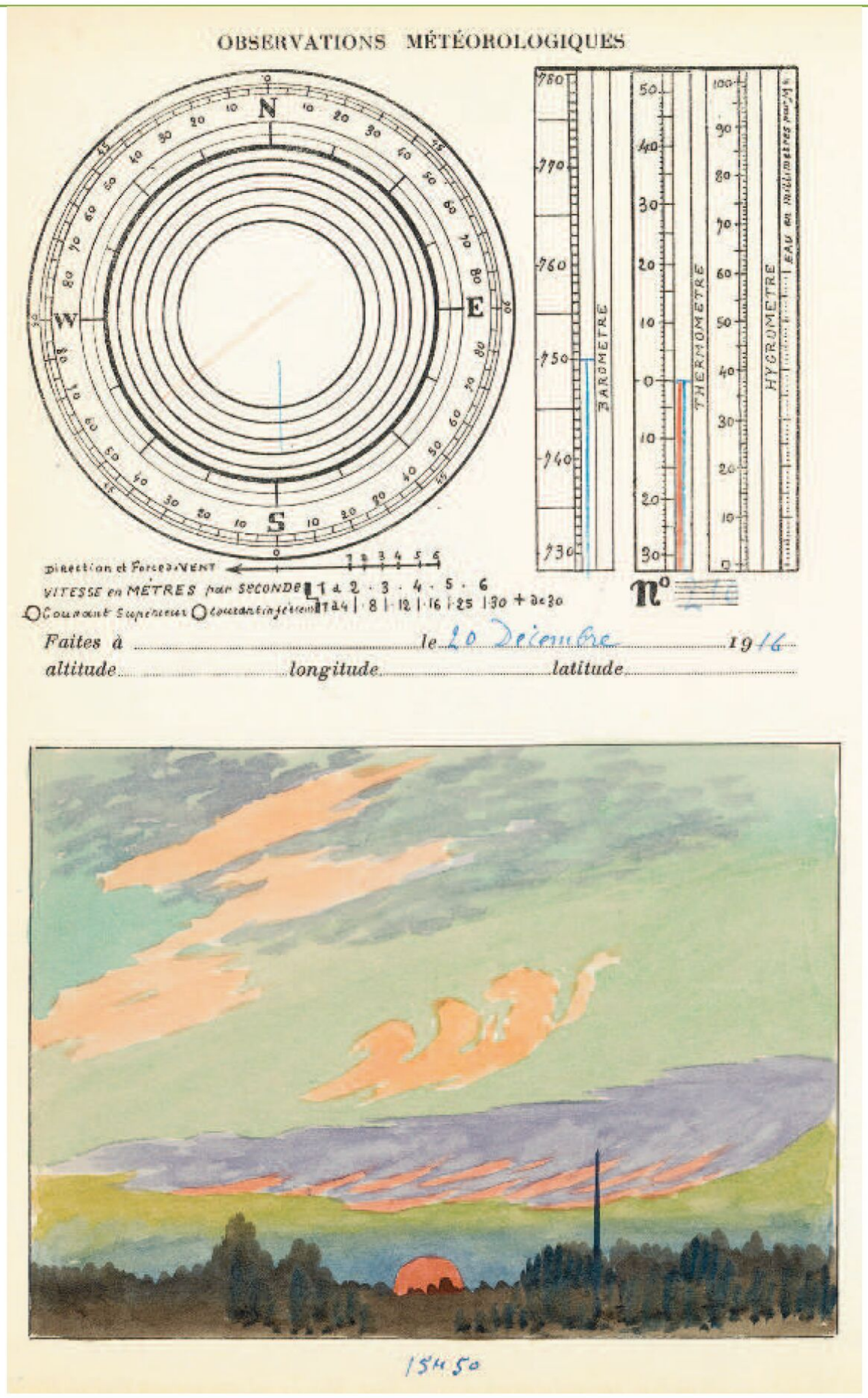
La force de Le Verrier est d'y croire malgré tout. En 1862, il recrute un brillant physicien, Hippolyte Marié-Davy, pour travailler sur les instruments d'étude du magnétisme terrestre,

La raison des dictons

### Lune cerclée, pluie assurée

**À la nuit tombée, ou presque, si le temps est clair, observez bien la Lune qui pointe le bout de son nez. Parfois, elle est cerclée d'un halo – à l'occasion irisé. Tendez le bras vers elle et écartez les doigts de la main. Si le diamètre apparent du halo représente peu ou prou la distance entre le pouce et l'auriculaire (un angle de quelque 22 degrés), le potager finira par être arrosé – ou le sol enneigé – d'ici une paire de jours. Ce collier qui orne la Lune marque en effet la présence de nuages de glace à très haute altitude, souvent l'en-tête de précipitations à venir.**

**D. Dq**




COLLECTION MÉTÉO-FRANCE - COURTOISIE JM. PEYROT DES GACHONS

**« Aquarelles météorologiques ».** C'est ainsi qu'on pourrait nommer les œuvres que peignait André des Gachons pour accompagner ses observations en plein air.

## André des Gachons, portraitiste du ciel

**Chaque jour, à heures régulières, André des Gachons (1871-1951) se postait avec chevalet, toiles et pinceaux aux alentours de sa maison de La Chaussée-sur-Marne (Marne) et scrutait le ciel. Dans sa besace, des instruments de mesure : hygromètre, baromètre, thermomètre et anémomètre. Car ce peintre d'inspiration symboliste, illustrateur de livres et fondateur de revues, était devenu bénévole pour le Bureau central de la météorologie en 1913. Il le restera jusqu'à sa mort. Pendant ces quatre décennies, l'artiste a peint environ 77 000 tableaux dont 9 600 petites aquarelles destinées au Service météorologique, chacune étant accompagnée des relevés de vent, de pression atmosphérique et de température. Un travail minutieux, scientifique et artistique.** ÉLIANE PATRIARCA

et lui confie également la charge du Bulletin. Marié-Davy se passionne pour la prévision des tempêtes. Au début de 1863, il se plonge dans les données accumulées dans les Bulletins. Il reporte sur une carte de l'Europe la pression mesurée à un instant donné dans les différentes stations, et relie les points de même pression par des courbes, dites isobares. Il réitère cette opération à intervalles de temps réguliers, puis compare ces cartes, dites synoptiques, afin d'y repérer des structures atmosphériques cohérentes. Influencé par les travaux du Britannique Henry Piddington sur les tempêtes tropicales, il espère ainsi identifier des cyclones, masses d'air en rotation autour d'une zone calme et de basses pressions. Mais ce qu'il observe, ce sont des zones de basses pressions couvrant plusieurs milliers de kilomètres, qui se déplacent dans la direction des vents et peuvent déclencher des tempêtes. Il les nomme « bourrasques »… *« En réalité, ce que Marié-Davy a découvert de manière empirique par la seule observation des cartes, ce sont les dépressions, qui seront à la base de la prévision météorologique. Il a joué un rôle aussi essentiel que méconnu »*, note Fabien Locher.

### Par prudence, le premier bulletin diffuse un « avis » et non une prévision

En septembre 1863, l'Observatoire de Paris publie le premier bulletin de « prévision » météorologique au monde, qu'il diffuse dans toute l'Europe. Par prudence, le mot même de prévision est cependant évité : le bulletin fournit *« un avis pour le lendemain »*, avec des probabilités. Très vite, une carte des isobares et des vents y est ajoutée par Marié-Davy. Pour la première fois, le 17 septembre 1863, le bulletin émet un avis de tempête : *« Menace à l'ouest sur l'océan. »* L'information manque encore de précision : la zone concernée va de Hambourg à Cancale… Les prévisions sont d'abord maritimes, à destination des marins et des pêcheurs mais, très vite, dans les années 1870, s'y ajoutent celles de grêle et d'orages ◆◆◆

**Fabien Locher,** *Le Savant et la tempête. Étudier l'atmosphère et prévoir le temps au XIXe siècle*, Rennes, PUR, 2008

**Jean-Pierre Javelle, Michel Rochas, Claude Pastre, Michel Hontarrède, Michel Beaurepaire, Bruno Jacomy,** *La météorologie, du baromètre au satellite*, Delachaux et Niestlé, 2000

**Alfred Fierro,** *Histoire de la météorologie,* Denoël, 1991

# À la station du Mont-Aigoual, le changement… c'est maintenant !

Désormais automatisé, l'observatoire de montagne de Météo-France a vu partir ses derniers agents en 2023, après cent trente ans de bons et loyaux services. Il accueille un centre consacré au changement climatique.

Au mont Aigoual, le ciel décoiffe. Depuis l'observatoire arrimé à son sommet entre Gard et Lozère, à 1 567 mètres d'altitude, le panorama – à 360 ⁰ – embrasse la Méditerranée et les Pyrénées, le puy de Sancy et les Alpes. La station météo qui enregistre les variables journalières depuis 1894 est celle de tous les superlatifs. Le mont Aigoual est l'un des sites les plus arrosés et les plus ventés de l'Hexagone : on y mesure en moyenne 2 mètres de précipitations par an, les rafales peuvent dépasser 300 km/h et le givre atteindre 1,20 mètre d'épaisseur en 24 heures. *« C'est un endroit très exposé. On peut rester dans la purée de pois pendant des jours et ne pas pouvoir redescendre à cause des congères »*, note Frédéric Atger, ancien directeur de Météo-France pour le Sud-Est. Les agents de cet organisme public qui y ont travaillé, du milieu du XXe siècle jusqu'à leur départ en 2023, avec l'automatisation, pouvaient y loger plusieurs jours de suite, *« un peu comme des gardiens de phare »*.

C'est l'ingénieur des eaux et forêts Georges Fabre, chargé de reboiser les pentes de l'Aigoual attaquées par l'érosion au milieu du XIXe siècle, qui fait bâtir l'édifice aux allures de forteresse. Épaulé par le naturaliste Charles-Marie Flahault, il plante sur ses flancs plus de 60 millions d'arbres.

CORINNE ROZOTTE / DIVERGENCE

**Soumise à des conditions météorologiques souvent extrêmes,** la station du Mont-Aigoual, dans les Cévennes, a produit cent vingt-cinq ans de mesures quasi ininterrompues.

Mais la tâche exige de sélectionner des espèces adaptées à ces conditions rudes, soumises aux pluies violentes du climat méditerranéen comme aux épisodes neigeux du climat atlantique qui se télescopent ici. *« Le début des relevés date de cette époque,* poursuit Frédéric Atger. *Agréger des valeurs pendant une période longue pour connaître le climat type, ses moyennes, ses extrêmes, c'est important pour un forestier ! »* Avec 125 ans de mesures quasi ininterrompues, la station de l'Aigoual a produit l'une des plus longues séries de données météorologiques de la planète. Collectées dans un environnement très peu modifié par l'humain, elles sont un témoin fiable du réchauffement. En 2022, on a compté vingt jours à 25 °C, contre à peine un par an dans les années 1990. Les climatologues chérissent cet observatoire dont les premiers carnets qu'on y a retrouvés, tout en pleins et en déliés, sont désormais archivés à Toulouse. *« Il y a dans cet endroit un concentré de changement climatique !* constate Robert Vautard, coprésident du groupe 1 du Giec *(lire aussi l'interview p. 51). C'est un lieu crucial pour montrer ses effets, qu'il s'agisse de la tendance moyenne à l'assèchement ou des pluies extrêmement fortes, avec des impacts variés sur les forêts et sur l'hydrologie. »* Le Climatographe, premier centre d'interprétation et de sensibilisation au changement climatique créé en France, a ouvert ses portes en juillet dernier dans les murs de l'observatoire. Un lieu dédié à la transmission de la mémoire du climat, dont l'Aigoual est une sentinelle.

**CÉCILE CAZENAVE**

F. ATGER

**« C'EST UN ENDROIT TRÈS EXPOSÉ. ON PEUT RESTER DANS LA PURÉE DE POIS PENDANT DES JOURS ET NE PAS POUVOIR REDESCENDRE À CAUSE DES CONGÈRES »**

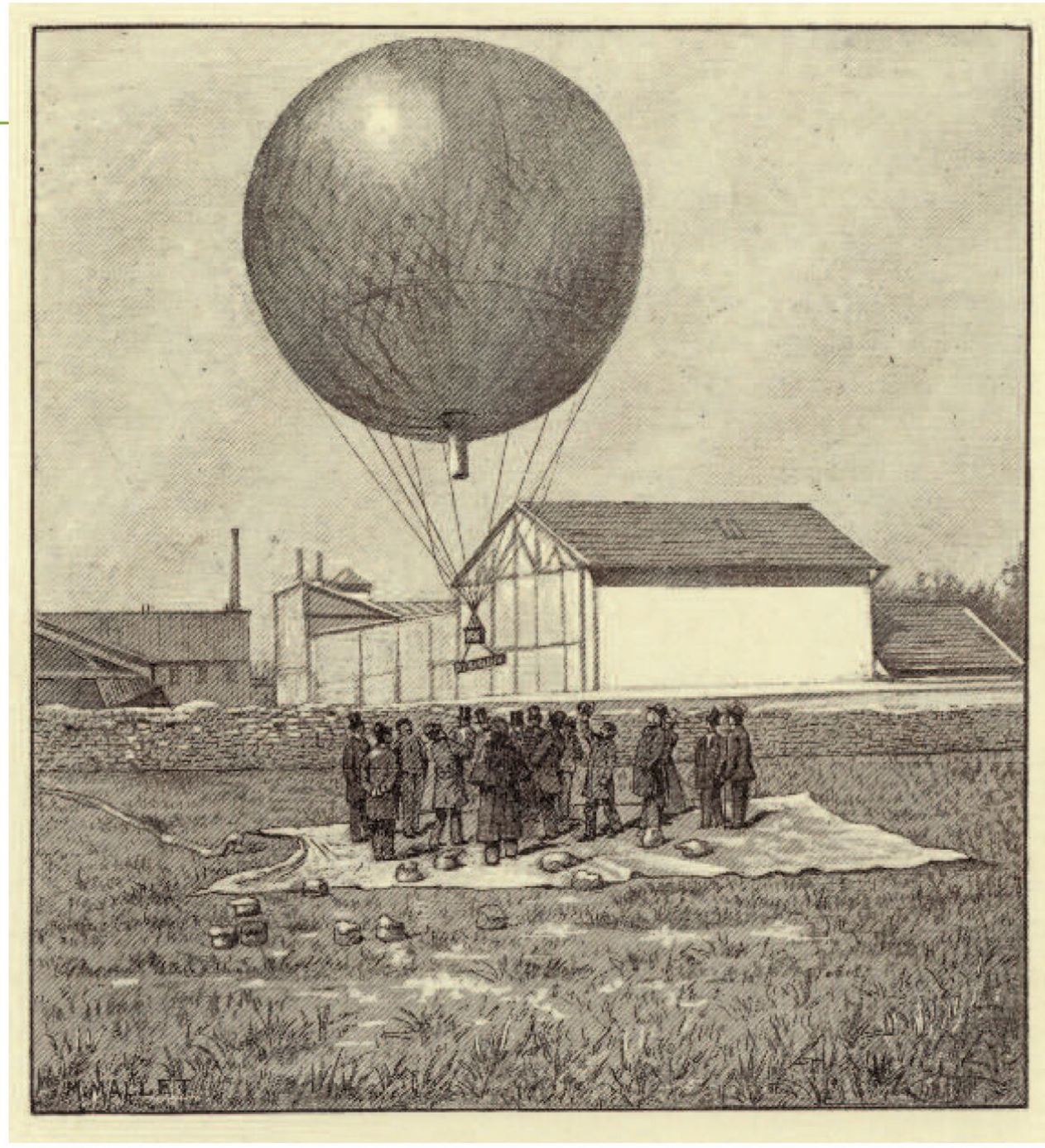
**Frédéric Atger,** ancien directeur de Météo-France pour le Sud-Est

◆◆◆ pour les paysans. Dans les deux cas, il s'agit d'anticiper des phénomènes dangereux. La carte synoptique est au cœur du dispositif. Le prévisionniste utilise une succession de ces cartes dans le temps pour prévoir le déplacement des dépressions. Selon les mots de Marié-Davy, à l'instar du médecin, il exerce un art, bâti sur des connaissances.

### Effectuées uniquement au sol, les observations sont encore imprécises

Entre 1863 et 1875, la France reste le pôle européen des prévisions. Mais peu à peu, les pays s'émancipent en créant leur propre Bureau, à commencer par le Royaume-Uni et les Pays-Bas. Les institutions météorologiques nationales échangent leurs données directement, sans plus passer par la France. De son côté, l'Observatoire de Paris traverse une période mouvementée. En 1865, Marié-Davy est écarté des postes à responsabilité à la suite d'un conflit avec Le Verrier… lui-même contesté pour son autoritarisme, et qui sera révoqué en 1870. Rappelé toutefois à son poste en 1873, Le Verrier refuse de participer au premier congrès international de météorologie qui se tient à Vienne l'année suivante, et dont il pressent qu'il contestera son autorité. *« En son absence, les délégations nationales entérinent le principe d'un échange égalitaire des données, qui condamne définitivement son rêve d'un système européen de prévision centré sur l'Observatoire de Paris »*, commente Fabien Locher, qui ajoute : *« Le Verrier a échoué : Paris n'est pas la capitale mondiale de la météorologie. Mais la méthode synoptique prévisionnelle et les dépressions ont conquis le monde. »* Reste que tant que les observations sont effectuées uniquement au sol, elles manquent de précision. Car ce sont les vents d'altitude qui déplacent les nuages. Et il faut attendre 1889 pour que les premières mesures « en altitude » soient effectuées, au sommet de la tour Eiffel. Et 1893 pour que le premier ballon-sonde soit lâché. De Paris.

MARIE-LAURE THÉODULE




LOOK AND LEARN / BRIDGEMAN IMAGES

**Le ballon-sonde Aérophile I** décolle du parc de Vaugirard, à Paris, le 21 mars 1893. Il atteindra l'altitude de 16 000 mètres et enregistrera la température la plus basse jamais constatée : – 57 °C.

## Howard et ses cumulus, Lamarck et ses diablotins…

Cumulus, nimbus, cirrus… Alors même que l'*Atlas international des nuages,* établi par l'Organisation météorologique mondiale, liste une centaine d'espèces de ces formations éphémères, nous n'en connaissons en général que quelques-unes. Et en savons moins encore sur l'inventeur de leur nom, le Britannique Luke Howard (1772-1864), qui jeta les bases de la classification encore en usage. Dès l'enfance, il est obsédé par les nuages. Mais à la demande de son père, il étudie la pharmacie et ouvre bientôt son officine. Toutefois, un soir de décembre 1802, le météorologue amateur donne une conférence sur la « modification des nuages » qui fait sensation. Il propose une classification inspirée de celle que le naturaliste suédois Carl von Linné (1707-1778) a établie pour les plantes. Ayant longuement observé ces masses d'eau en mouvement permanent, le jeune scientifique a identifié trois formes de base : les cirrus, fins et d'apparence filamenteuse ; les cumulus, volumineux et bien délimités ; les stratus, bas et formant une nappe. Les autres formes résultant d'une modification ou d'une transition entre ces trois motifs, Howard crée quatre catégories intermédiaires : cirro-stratus, cirro-cumulus, cumulo-stratus, cumulo-cirro-stratus ou nimbus (le nuage de pluie). Un cirrus qui s'étend en couches sera ainsi appelé cirro-stratus. Or cette même année 1802, à Paris, le naturaliste Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) dévoile sa propre nomenclature : diablotins, coureurs, demi-terminés, boursouflés, en balayures… Plus poétique, mais bien moins rigoureux ! Établie en latin, langue véhiculaire de la communauté scientifique, la classification de Luke Howard se diffuse progressivement jusqu'à s'imposer comme une référence internationale, ouvrant ainsi la voie à la météorologie moderne. ÉLIANE PATRIARCA

# ET S'IL AVAIT FAIT BEAU CE JOUR-LÀ ?

Que serait-il arrivé si l'Invincible Armada n'avait pas été prise dans la tempête ? Si des pluies torrentielles n'avaient noyé Waterloo en 1815 ? Si l'hiver de 1954 n'avait été aussi glacial, provoquant la révolte de l'abbé Pierre ? Cela aurait été… une autre histoire.

Mai 1588. Une flotte de 130 navires, avec 19 000 soldats à bord, cingle vers les Flandres où elle doit embarquer une seconde armée. L'objectif du roi d'Espagne Philippe II : envahir l'Angleterre pour détrôner Elisabeth Ire et rétablir le catholicisme. Mais le 8 août, l'Armada, qui mouille devant Calais, essuie une violente attaque anglaise. Afin d'éviter un incendie généralisé, les Espagnols coupent les amarres… Poussée par les courants et un fort vent du sud, la flotte est dispersée et le débarquement ajourné. Le duc de Medina Sidonia tente de regrouper ses navires. En vain. Il ne lui reste qu'une solution : tenter de rallier l'Espagne… en contournant les îles Britanniques par le nord. Pris dans de violentes tempêtes et sur une mer déchaînée, plus de vingt vaisseaux feront naufrage au large de l'Irlande. Seule la moitié de la flotte rejoindra les eaux espagnoles… Cet échec cuisant consolide le protestantisme en Angleterre et met un terme à la domination exclusive de l'Espagne sur l'Atlantique.

La météo, parfois, fait ainsi l'histoire, décimant des populations, faisant vaciller un régime, changeant le cours d'une bataille… En France, un cas emblématique, attesté dans les chroniques, nous ramène à la guerre de Cent Ans, en septembre 1415. Le roi d'Angleterre Henri V a assiégé avec succès le port d'Harfleur, qui commande l'estuaire de la Seine. Les maladies ont toutefois décimé son armée, et il compte rallier son bastion de Calais. Mais l'ost du roi de France – fort d'au moins 15 000 hommes et commandé par le connétable Charles d'Albret – le prend en chasse… L'affrontement a lieu le 25 octobre 1415 sur le plateau d'Artois gorgé d'eau, près d'Azincourt.

« *Le mauvais temps est pour beaucoup dans la victoire anglaise, mais cette bataille est d'abord une défaite française*, analyse Valérie Toureille, professeure d'histoire médiévale à l'université de Cergy-Paris. *Les chefs militaires, trop sûrs de leur supériorité numérique, n'ont pas tenu compte de l'état du terrain, ni de la pluie, ni même de la pente qui, bien que légère, allait donner l'avantage aux Anglais. Le roi Henri a employé une tactique qui avait fait ses preuves, avec des rangs d'archers protégés par des pieux. Les Français ont voulu charger à cheval, mais aussi à pied, en armure lourde, et ils se sont enlisés dans les labours détrempés…* » Bilan ? Près de 6 000 d'entre eux (contre peut-être 400 ou 500 Anglais) auraient péri en quatre heures, dont la fine fleur de la chevalerie. Un désastre sans précédent dans l'histoire du royaume !

Quatre siècles plus tard, à l'aube du 18 juin 1815, à Waterloo, plaines et vallons de Belgique sont eux aussi détrempés par

**Louis Bodin,** *Quand la météo fait l'histoire*, Albin Michel, 2015

**Valérie Toureille,** *Le Drame d'Azincourt. Histoire d'une étrange défaite*, Albin Michel, 2015

**François Houdecek,** *Vivre la Grande Armée*, CNRS Éditions, 2023

**Site de la fondation Napoléon :** https://www.napoleon.org/

**L'histoire sur le site de Météo France :** meteofrance.com/meteo-et-histoire

EMMANUELLE MARCHADOUR/EDITIONS PERRIN

**« À AZINCOURT, LES FRANÇAIS ONT VOULU CHARGER EN ARMURE LOURDE ET SE SONT ENLISÉS DANS LES LABOURS DÉTREMPÉS »**

**Valérie Toureille,** historienne, université de Cergy-Paris

PHOTO JOSSE / BRIDGEMAN IMAGES

**La retraite de Russie** sonne le glas de l'aventure napoléonienne. Le « Général Hiver » décime une Grande Armée déjà épuisée (gravure de 1813, artiste inconnu).

les pluies torrentielles qui se sont abattues les jours précédents. Napoléon n'engage la bataille qu'en fin de matinée, à la faveur d'une éclaircie, espérant que les sols seront moins meubles. « *Les artilleurs français s'étaient faits les experts du rebond des projectiles, qui multipliait les effets dévastateurs de ceux-ci,* souligne François Houdecek, spécialiste d'histoire militaire à la Fondation Napoléon. *Mais en s'enfonçant dans le sol, les boulets de canon n'ont pas l'effet escompté… De même, la cavalerie est ralentie dans ses déplacements.* » Par ailleurs, les Prussiens arrivent en renfort avant que la Grande Armée ne parvienne à percer les lignes défensives anglaises. L'Empereur sonne la retraite… et abdique quatre jours plus tard.

### À Versailles, le gel pétrifie les oiseaux et fait éclater les carafes de liqueur

Trois ans plus tôt, c'est le « Général Hiver » qui a piégé Napoléon lors de sa campagne de Russie (juin-décembre 1812), pour laquelle celui-ci a mobilisé près de 600 000 hommes. Il atteint Moscou le 14 septembre, mais tarde à quitter la ville que le gouverneur Rostopchine a fait incendier. Il espère – en vain – que le tsar va accepter ses offres de négociation. Et l'hiver lui semble encore loin… « *La météo n'est pour lui qu'une contingence extérieure qui ne doit pas influencer ses décisions* », rappelle François Houdecek. Le 19 octobre, l'Empereur se résout toutefois au départ. Mais à la bataille de Maloïaroslavets, le 24, le général Koutouzov le contraint à passer plus au nord que prévu. Les premières neiges tombent en novembre, et l'hiver glacial se referme bientôt sur la Grande Armée, déjà harcelée par l'ennemi et la faim. « *Catastrophique, le bilan des pertes (morts, déserteurs, prisonniers, blessés) est estimé entre 350 000 et 400 000 soldats* », ◆◆◆

**La raison des dictons**

### Cloportes en foule sur un mur, le mauvais temps est sûr

**Le bestiaire météorologique est souvent trompeur. Le cloporte, pourtant, honore le dicton qui le fait messager de nouvelles pluvieuses. Car ce crustacé – le seul à vivre exclusivement sur terre – apprécie les lieux humides et surtout sombres. Il lui faut donc une bonne raison pour sortir de sa cachette. Une motivation à gambader qui annonce une dégradation du temps, marquée par un air devenu plus humide. D. Dq**

PHOTO JOSSE / BRIDGEMAN IMAGES

◆◆◆ conclut l'historien. Recevant une mission diplomatique française un an plus tôt, le tsar avait prévenu : *« Notre climat, notre hiver feront la guerre pour nous. »*

Le froid ne change pas que le sort des batailles. En 1709, l'Europe tout entière connaît les affres d'un air polaire soufflant par vagues. *« Le froid est si horrible en ce pays-ci que depuis l'an 1606, à ce qu'on prétend, on n'en a pas vu un tel »*, raconte la Princesse Palatine, belle-sœur de Louis XIV, dans une lettre du 2 février. Les fleuves sont pris par les glaces, le gel pétrifie les oiseaux, fend les arbres avec fracas et fait éclater les carafes de liqueur à Versailles. Resté dans la mémoire collective comme le « Grand Hiver », cet épisode extrême – on relève jusqu'à -16,3 °C à Paris, -25 °C dans la Beauce – fait ressurgir le spectre de la famine des années 1693-1694, qui avait causé 1,3 million de morts. Céréales, vignes et légumes sont perdus. Dans un royaume déjà épuisé par les guerres incessantes, la misère engendre émeutes et pillages, et charrie son cortège d'affamés errants, *« pâturant comme des bêtes, leur visage décharné, pâle, livide, noir et abattu, leur corps chancelant, semblables à des squelettes »*, comme les décrit le curé de Saisy, en Bourgogne. Plus généralement, les crises de subsistance ont rythmé, en France, le Petit Âge glaciaire, qui s'étend de 1300 à 1860 environ.

**L'hiver 1788-1789** a été marqué par une vague de froid sans précédent. *« Des femmes faisaient cuire dans les places publiques des choux et autres racines »*, écrit l'auteur de cette gouache, Jean-Baptiste Lesueur. Et la révolte gronde…

Autre exemple d'événement décisif, un an et un jour avant la prise de la Bastille, le 13 juillet 1788 : un orage de grêle d'une rare violence traverse la France et dévaste les terres, des Landes à la Belgique. Si les calamités météorologiques n'ont pas provoqué la chute de la monarchie, le dérèglement des saisons cette année-là – pluies diluviennes l'été, sécheresse au printemps et à l'automne, hiver précoce et

## L'artillerie ukrainienne guidée par… les nuages

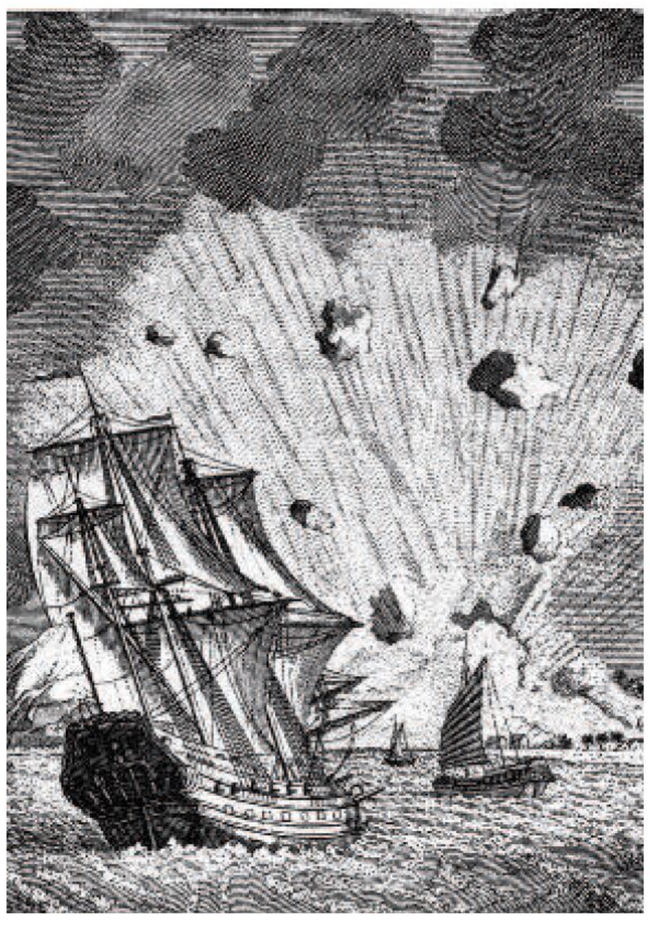
Le 14 avril 2022, l'Ukraine remporte une de ses plus grandes victoires contre l'envahisseur : la destruction du navire amiral de la flotte russe en mer Noire, le croiseur Moskva. Mais comment une armée pratiquement dépourvue de forces maritimes a-t-elle pu détruire le joyau de la marine ennemie ? La Russie évoque d'abord un incendie accidentel qui aurait déclenché une explosion de munitions. D'autres sources affirment que le renseignement américain aurait aidé l'Ukraine à détecter le vaisseau.

L'explication est bien plus terre à terre… ou mer à ciel. C'est avec un simple radar que les forces ukrainiennes auraient réussi à détecter le Moskva, grâce à un phénomène atmosphérique nommé « couche d'inversion ». En temps normal, la température de l'air décroît avec l'altitude. Mais cette dynamique peut s'inverser, notamment à la surface de grandes masses d'eau. Ce phénomène crée un plafond d'air qui emprisonne des nuages, des polluants… et des ondes électromagnétiques. À cause de ce couvercle naturel, les ondes du radar, au lieu de se perdre à l'horizon, restent coincées dans ce couloir entre eau et nuages et épousent la courbure de la planète, ce qui augmente leur portée. Croisant à une centaine de kilomètres des côtes ukrainiennes, le navire russe se croyait à l'abri des radars ennemis (dont la portée normale est de 18 kilomètres). Mais les conditionsatmosphériques de cet après-midi nuageux ont changé la donne : il est devenu le plus grand vaisseau de guerre coulé au combat depuis la Seconde Guerre mondiale.

NICOLAS GUTIERREZ C.

## En 1815, l'éruption qui ébranla le monde

5 avril 1815. Le volcan Tambora (sur l'île de Sumbawa, en Indonésie) s'effondre, pulvérisé par la plus violente éruption du dernier millénaire. Ébranlé par des explosions successives perçues jusqu'à Sumatra, à 2 000 kilomètres de là, il expulse en quelques jours plus de 30 kilomètres cubes de magma, un panache de 43 kilomètres d'altitude et plusieurs dizaines de millions de tonnes de soufre, de chlore et de fluor qui empoisonnent l'air jusque dans la stratosphère (au-dessus de 15 kilomètres d'altitude). Aux flots de lave et aux nuées ardentes dévastatrices succèdent pluies de pierres et de cendres, tsunamis, épidémies de dysenterie et famines, pour un bilan estimé à au moins 70 000 victimes rien que sur Sumbawa et Lombok, l'île voisine. Portés par les vents, les nuages de soufre qui ont voilé le soleil auraient provoqué un refroidissement moyen de l'hémisphère Nord d'environ 1°C durant deux, voire trois ans. En Europe, 1816 est restée dans les annales comme « l'année sans été », marquée par des pluies diluviennes et des températures hivernales. De Lausanne à Naples en passant par Paris, gazettes et colporteurs se font l'écho des angoisses des populations. Une atmosphère de fin du monde qui aurait inspiré son *Frankenstein* à Mary Shelley… **L. B.**



SZ PHOTO / BRIDGEMAN IMAGES

**Le volcan Tambora s'embrase,** provoquant en Europe une « année sans été ».

rigoureux (86 jours de gelée à Paris !) – fait à nouveau flamber le prix du pain, ce qui nourrit un mécontentement social propice à l'embrasement révolutionnaire. L'historien Jean Nicolas a recensé 58 émeutes frumentaires sur l'ensemble de l'année 1788… et 239 au cours des seuls quatre premiers mois de 1789 !

### En 1856, Napoléon III surfe sur les inondations pour soigner sa popularité

Les intempéries d'ampleur sont parfois habilement exploitées par le pouvoir. Fin mai-début juin 1856, à la suite d'orages et de pluies ininterrompues, le Rhône, la Saône, la Loire, la Garonne et leurs affluents débordent. Les digues cèdent ; les voies de communication sont coupées. Contrairement à Louis-Philippe, qui a précipité sa chute en refusant d'intervenir pour faire baisser le prix du pain après la canicule de 1846, Napoléon III se lance dans une grande tournée : il traverse en barque les champs inondés pour constater les dégâts, alloue des crédits pour l'aide aux victimes et la reconstruction, réconforte les sinistrés… Les gazettes et l'art officiel louent la magnanimité de l'empereur, qui cultive ainsi sa popularité non sans lancer un réel programme de grands travaux et la première politique publique de prévention des catastrophes naturelles. *« Je tiens à l'honneur qu'en France les fleuves rentrent dans leur lit et qu'ils n'en puissent plus sortir »*, déclare-t-il devant la Chambre des députés en 1857. Près de cent ans plus tard, lors du glacial hiver 1954, c'est un député à poigne, l'abbé Pierre, qui réveillera les consciences et secouera la classe politique. Le 1er février, sur les ondes de Radio Luxembourg, il lance son célèbre appel pour venir en aide aux milliers de sans-abri dans une France en pleine reconstruction qui manque de logements décents. Aujourd'hui encore, comme le rappelait un éditorialiste en 1910, lors de la crue de la Seine, *« il faut peu de chose pour que toute l'admirable machine qu'est notre civilisation, son orgueil, ses progrès, soit tenue en échec par les forces encore indomptées : le vent, le feu, l'eau, tout ce qui détruit, tout ce qui dévore »*.

**LAUREEN BOUYSSOU**

**La raison des dictons**

### Noël au balcon, Pâques au tison

Parmi les innombrables adages qui s'essaient à la prévision à moyen terme, nul n'est plus célèbre que celui mettant en regard deux dates clés du calendrier chrétien. Las ! À Noël 2018, *Ouest-France* s'est amusé à livrer quelques statistiques pour Paris depuis 1947, en attribuant à Pâques une date moyenne – le 8 avril –, la fête se promenant, suivant les années, du 22 mars au 25 avril. Jolie fourchette, mais passons. Sur le critère d'une température à Pâques plus basse qu'au Noël précédent, le dicton ne s'est vérifié que quinze fois ! Autre exemple de ce type de prévision hasardeuse : « Quand il pleut à la Saint-Médard, il pleut quarante jours plus tard. » On peut cependant entendre le dicton comme un certain R.-O., dans les *Archives suisses des traditions populaires* 1930-1931 : « Quand il pleut à la Saint-Médard, il pleut quarante jours après… quelque part ! » **D. Dq**

# Quand le ciel se fait le miroir de l'âme

La pluie et le beau temps jouent sur notre humeur… mais cela n'a pas toujours été le cas. Cette « météosensibilité » est née il y a deux siècles, sous la plume des romantiques.

Pour entamer une conversation, au téléphone, ou devant la machine à café avec ses collègues, quoi de plus simple que de parler de la pluie et du beau temps ? Terrain neutre et consensuel, la météo nous offre un parfait *« embrayeur conversationnel »*, selon l'expression du sociologue américain Erving Goffman. Parler du temps qu'il fait, cela peut être aussi une manière de « briser la glace », de parler de soi allusivement, la météo se muant en une métaphore de nos états d'âme et de notre niveau de forme : le ciel gris et la pluie induiraient une certaine mélancolie et un moral en berne, la lumière du soleil engendrerait un regain d'énergie, le ciel bleu insufflerait un optimisme joyeux… Un « temps pourri » nous permet ainsi de *« justifier une paresse, une fatigue, un vague à l'âme, un malaise ou mal-être »*, observe l'ethnologue Martin de la Soudière, qui a forgé dans les années 1990 le néologisme de « météosensibilité » pour rendre compte de l'effet psychologique ou physiologique du temps qu'il fait *(lire aussi l'interview p. 77)*.

Une sensibilité d'invention récente, selon l'historien Alain Corbin : on n'a pas toujours vu dans le ciel le miroir de nos âmes, rappelle-t-il dans un ouvrage collectif sur les émotions et les effets psychologiques qu'ont provoqués au fil des siècles les météores, de la pluie au brouillard en passant par le soleil, l'orage, la neige : c'est *« au XVIIIe siècle que s'est intensifiée la sensibilité de l'individu aux phénomènes météorologiques »*. Ce qui ne signifie pas que les hommes ne regardaient pas le ciel auparavant ! Au contraire, on l'inspectait sans cesse, notamment parce que les récoltes, donc la survie, en dépendaient. Mais la certitude est alors ancrée que *« les événements célestes et marins, susceptibles de déterminer les précipitations, sont entre les mains de la divinité qui suscite les pluies, crée les nuages sombres, provoque les orages »*, ajoute l'historien. Croyances qui ont engendré de nombreux rituels, les prêtres étant tenus d'agir pour faire venir la pluie ou au contraire la faire cesser. *« Les hommes du passé, avant que la science n'effectue, au XIXe siècle, une sécularisation du ciel, scrutaient celui-ci afin de discerner les signes d'une colère de Dieu ou d'une intervention du diable. »* Le temps gardait une dimension collective, *« sans lien avec le ressenti individuel »*.

## Avec le romantisme apparaît un « moi météorologique »

En quête d'écrits témoignant de l'émergence d'une sensibilité intime à la météo, Alain Corbin a trouvé dans la correspondance de Madame de Sévigné (1626-1696) plusieurs centaines d'allusions au temps qu'il fait. Ces lettres sont marquées par les connotations négatives de la pluie, qu'elle associe à une *« humeur sombre »*, une *« tristesse épouvantable »*. Une idée qui semble banale aujourd'hui, mais qui fait de l'épistolière une pionnière. Néanmoins, nuance l'historien, si la marquise apprécie le beau temps ou déteste la pluie, c'est surtout pour des raisons matérielles – son carrosse s'embourbe, la pluie provoquant des *« abymes d'eau »* le long des chemins, dérange ses promenades – ou médicales. Ses lettres reflètent en effet des convictions dérivées de la

**La raison des dictons**

**Quand on voit l'Angleterre, c'est qu'il va pleuvoir. Quand on ne la voit pas, c'est qu'il pleut déjà**

Vue ici de la côte d'Opale, cette maxime est quasi universelle sur les rivages français. On la retrouve sur les littoraux normand, breton et vendéen, évoquant la perception des îles depuis la côte. Ce qui avait inspiré, depuis Deauville, le célèbre *« Quand on voit Le Havre… »* de Tristan Bernard. Cela tient à un phénomène optique bien connu : à l'approche de précipitations, la visibilité s'améliore sensiblement parce que la pluie au loin a nettoyé l'atmosphère de ses poussières. Puis, quand elle arrive, on n'y voit goutte. Le folklore populaire propose d'ailleurs une déclinaison nocturne de cet adage, qui s'explique par la même raison : *« Firmament bien étoilé, changement de temps peu éloigné. »* **D. Dq**

**Averse bienfaitrice.** Alors que sécheresses et canicules se multiplient, la pluie retrouve une connotation positive.

GETTY IMAGES

« médecine humorale », *« fondée sur le postulat de correspondances entre les propriétés des météores et les humeurs du corps humain, qui remonte à Empédocle, puis Hippocrate* (Traité des airs, des eaux et des lieux) *et Aristote* (Les Météorologiques) *»*, précise Martin de la Soudière. Avec la marquise de Sévigné, le temps demeure encore à l'extérieur de l'âme.

C'est à la fin du XVIIIe siècle que s'exacerbe la sensibilité au temps qu'il fait, observe Alain Corbin. Et le romantisme consacre l'avènement d'un « moi météorologique », comme le lit l'historien chez les écrivains, diaristes ou épistoliers. *« J'applique le baromètre à mon âme »*, écrivait déjà Rousseau (1712-1778) dans *Les Rêveries du promeneur solitaire*. Bernardin de Saint-Pierre (1737-1814), quant à lui, évoquait dans ses *Études de la nature* (1784) les plaisirs de la pluie et du mauvais temps, comparables à ceux que procure la mélancolie. *« Dans le mauvais temps, le sentiment de ma misère humaine se tranquillise, en ce que je vois qu'il pleut et que je suis à l'abri ; qu'il vente et que je suis dans mon lit bien chaudement. Je jouis alors d'un bonheur négatif. »* Comme tant d'autres, l'écrivain associe la pluie et les larmes. Le philosophe américain Henry David Thoreau (1817-1862), lui, magnifie la pluie dans laquelle il perçoit *« une bienveillance aussi infinie qu'inconcevable »* : *« Si elle est bonne pour l'herbe, elle est bonne pour moi »*, assure-t-il. Au contraire de Stendhal (1783-1842), qui craint ces *« pluies continuelles, éternelles, vilaines, infâmes, épouvantables »*. Baudelaire (1821-1867) fait du paysage urbain pluvieux une image du spleen, tandis que pour Verlaine (1844-1896), *« la pluie s'accorde au mélancolisme et favorise une tristesse sans aucune raison qu'elle-même »*. ◆◆◆

FLORENCE BROCHOIRE / SIGNATURES

**« AVANT QUE LA SCIENCE N'EFFECTUE, AU XIXE SIÈCLE, UNE SÉCULARISATION DU CIEL, LE TEMPS QU'IL FAIT RESTAIT SANS LIEN AVEC LE RESSENTI DE L'INDIVIDU »**

**Alain Corbin,** historien

◆◆◆ Les états du ciel et les états d'âme apparaissent désormais liés par d'intimes correspondances.
Face au soleil, notre sensibilité a évolué de manière encore plus frappante, montre l'historien et sociologue Christophe Granger : on est passé de *« la plus noire détestation à la délectation la mieux célébrée, le tout en à peine deux siècles »*. Longtemps, on a craint que la fréquentation de l'astre *« n'enflamme le corps et n'allume le cerveau »*. Puis est arrivé le courant de l'hygiénisme, préconisant au contraire l'exposition au soleil. Avec Pasteur, le soleil s'est mué en grand purificateur, apte à enrayer la macération microbienne. Au début du XX^e^ siècle, le tourisme balnéaire se développe. Avec les congés payés, après la guerre, culmine la recherche des bienfaits des bains de soleil. Dès les années 1970 s'amorce pourtant une nouvelle tendance, la méfiance, avec la dénonciation des dangers des rayons solaires pour la peau. Puis, en 2003, la canicule *« impose dans l'appréciation du temps qu'il fait une angoisse collective à l'égard des excès d'une exposition au soleil »,* note Christophe Granger.

### "Y a plus d'saisons", un leitmotiv qui traverse les siècles

Pour Martin de la Soudière, notre sensibilité psychologique ou physiologique au temps qu'il fait est aujourd'hui hypertrophiée. La météo est devenue un phénomène de société, écrit-il, dont la montée en puissance s'est accentuée à partir des années 1980 avec sa médiatisation. *« Elle devient alors une information majeure, avec son propre journal, ses cartes et décors de plus en plus recherchés pour célébrer le ciel, et la personnalisation toujours plus poussée de ses présentateurs… »* Symptomatique à cet égard, selon l'ethnologue, *« l'emploi maintenant répandu et étymologiquement abusif du terme "météo" en lieu et place de "temps" »*. On qualifie la météo de clémente ou maussade… ce qui n'a aucun sens !
Désormais, nous sommes entrés dans ce que Martin de la Soudière nomme *« le temps du climat, une phase d'anxiété, de responsabilisation collective »*. Même si l'idée et la crainte d'un dérèglement du climat ne sont pas neuves. Au contraire, *« ce sentiment de perte d'un ordre antérieur présente une continuité remarquable. Il semble ressortir à la tendance plus globale des hommes et des cultures à idéaliser le passé »*, poursuit-il. « Y a plus d'saisons » est un leitmotiv qui traverse les siècles : Martin de la Soudière en cite une première occurrence au III^e^ siècle ap. J.-C., *« lorsque Cyprien de Carthage, évêque martyr, écrit :* "Le monde lui-même le dit et témoigne assez qu'il approche de sa fin. Il tombe moins de pluie en hiver pour nourrir les semences. Le soleil n'est plus si chaud en été pour mûrir les fruits. Le printemps n'est plus si agréable, ni l'automne si fécond" ». Bien plus tard, François Villon (1431-après 1463) demande : *« Mais où sont les neiges d'antan ? »* Deux siècles après, Madame de Sévigné décrit *« un froid contre toute raison »*, un *« temps assez équivoque »*, *« détraqué »*. Sans le savoir, elle évoque ainsi une caractéristique du Petit Âge glaciaire : une série d'hivers longs et froids.

### Nous idéalisons le temps d'hier, celui de notre enfance

Dans *Sido*, Colette exprime la nostalgie des saisons d'antan : *« Il y avait dans ce temps-là de grands hivers, de brûlants étés. J'ai connu, depuis, des étés. […] Mais aucun été, sauf ceux de mon enfance, ne commémore le géranium écarlate et la hampe enflammée des digitales. Aucun hiver n'est plus d'un blanc pur. »*
Nous idéalisons le temps d'hier, de notre enfance, parce que *« notre mémoire est indexée sur le rapport affectif que nous entretenons avec notre propre passé »*, analyse Martin de la Soudière. Ce qui a changé aujourd'hui, c'est qu'au fantasme *« Il n'y a plus de saisons »* succède une certitude scientifique, et la *« prise de conscience de la responsabilité humaine dans la marche de la machine climatique »*.
Notre passion-fascination pour la météo témoigne, selon Martin de la Soudière, d'une intranquillité profonde. *« La prévision météo nous rassure car elle est le gage qu'il y aura bien un lendemain […]. Chercher ainsi à tout prix et sans relâche, à maîtriser le temps qu'il fait, c'est implicitement, vouloir contrôler et ralentir celui qui passe. »*

**ÉLIANE PATRIARCA**

**La raison des dictons**

**When the ditch and pond offend the nose, then look out for rain and stormy blows**

Une fois n'est pas coutume, plongeons-nous dans un adage britannique, tant il est délicieux à l'oreille. Dans la langue de Molière, cela donne quelque chose comme : « Quand l'étang et le fossé offensent le nez, pluie et vent ne vont pas tarder. »
Et cela tient à une bonne raison : l'approche du mauvais temps se traduit par une baisse du baromètre. Or, une moindre pression atmosphérique, tout comme l'humidité, stimule les émanations des molécules odorantes. Celles des roses… ou du lisier ! Quant aux parfums de terre parfois enchanteurs qu'on hume après une averse ou un orage, ils viennent du pétrichor, un liquide huileux sécrété par les plantes. Mouillé, il libère des molécules qui concourent à l'odeur de pluie.

**D. Dq**

**Martin de la Soudière,** *Au bonheur des saisons. Voyage au pays de la météo*, Grasset, 1999

**Alain Corbin (dir.),** *La Pluie, le soleil et le vent. Une histoire de la sensibilité au temps qu'il fait,* Aubier, 2013

**MARTIN DE LA SOUDIÈRE**
Ethnologue à l'École des hautes études en sciences sociales

# « La météo répond à un besoin de confort »

Soucieux d'anticiper les aléas, nous prêtons aux prévisions une attention croissante… qui peut frôler l'addiction.

JULIEN FALSIMAGNE/OPALE.PHOTO

**Selon une étude britannique, les Anglais passeraient 49 heures par an, soit près de 10 minutes par jour, à parler de la météo. Davantage que de travail ou de sport. Comment interpréter ces chiffres ?**
C'est un sujet universel et consensuel, et qui facilite les interactions humaines. Alors qu'il est réputé futile ou sans intérêt, il revêt en réalité un rôle social important. Car les discussions sur le temps qu'il fait nous servent à entrer en contact avec autrui et à prendre conscience que nous partageons des préoccupations, voire des émotions, communes.

**Pourtant, connaître les prévisions n'est pas indispensable à la vie urbaine de la majorité d'entre nous…**
Les humains ont toujours prêté une attention particulière à la météo, mais les enjeux ne sont plus les mêmes. Autrefois, la survie des paysans et de la population en dépendait. Plusieurs semaines de pluie ou de sécheresse pouvaient mettre à mal les productions agricoles. Aujourd'hui, connaître la météo répond à un besoin de confort, c'est un luxe que l'on se permet et que notre société hyper-connectée ne fait que renforcer.

**Les applications mobiles permettent aujourd'hui de consulter les prévisions à tout moment. Est-ce une façon de se rassurer ?**
Il est évident que de manière générale, nous supportons de moins en moins les aléas. Avant de réserver un hôtel ou un restaurant, nous consultons sur Internet les avis exprimés par d'autres. Et nous souscrivons une assurance au cas où notre train serait annulé ou notre voiture tomberait en panne… Il en va de même pour les risques météorologiques. Mais, par nature, la météo est imprévisible ! Comme nous voulons nous prémunir de cet aléa, notre attention au temps qu'il fait se décuple… jusqu'à nous faire consulter plusieurs fois par jour les prévisions. C'est une forme de dépendance psychologique, qui frôle parfois l'addiction… Ce qu'on peut appeler « météomanie » ou « climatomanie ». En outre, ces applications mobiles – avec le suivi en temps réel de multiples données telles que l'hygrométrie, la force du vent ou la température ressentie – nous permettent de « monitorer » la nature qui nous entoure et, d'une certaine manière, de nous relier davantage à elle.

**Est-ce aussi une façon de maîtriser l'avenir ?**
Tout à fait. Notre intérêt constant pour la météo répond à un besoin de nous projeter et d'organiser notre temps. Nous estimons qu'il doit faire beau le week-end pour pouvoir profiter de notre liberté. Et si l'inverse se produit, cela crée une frustration que nous avons du mal à contrôler. Par ailleurs, je remarque que nous tolérons de moins en moins les températures extrêmes. Un temps trop chaud nous inquiète, le froid nous fait râler. Consulter les prévisions nous prépare à maîtriser nos « émotions météorologiques » et à ne pas subir le temps qu'il fait.

**Le dérèglement climatique auquel nous sommes confrontés renforce-t-il cette obsession ?**
Il nous fait considérer les prévisions avec plus de sérieux. La preuve en est que la population suit les alertes vigilance avec le plus grand intérêt. Je pense aussi que nous avons du mal à regarder en face la réalité du changement climatique, par peur de l'avenir et parce qu'il est difficile de se représenter ses répercussions. La météo, elle, est tangible. Elle apporte la preuve qu'il se passe quelque chose. L'attention, parfois démesurée, que nous portons à la météo est une manière de concrétiser ce réchauffement climatique qui nous menace.

PROPOS RECUEILLIS
PAR RIVA BRINET-SPIESSER

# Mourir de chaud, littéralement…

Si notre organisme est sensible aux grands froids, ce sont les vagues de chaleur extrême qui peuvent s'avérer fatales, surtout lorsqu'elles s'accompagnent d'une forte humidité.

"Mes rhumatismes reprennent: il va pleuvoir"! *Ce type d'interprétation populaire ne repose sur aucun fondement scientifique,* affirme Christian Jorgensen, professeur de rhumatologie au CHU de Montpellier. *D'autres invoqueront la chaleur, ou bien le froid. Aucune étude solide ne met en relation le temps qu'il fait avec les crises d'arthrose. Peut-être les personnes sont-elles simplement plus moroses quand il pleut, moins mobiles, plus concentrées sur leurs douleurs.* » Dans le domaine de recherche de cet expert, une seule maladie inflammatoire touchant les vaisseaux sanguins, la vascularite, a une relation avérée avec le froid. Elle serait sensible à des germes impliqués dans des pathologies ORL.

Car si le froid est un stimulant reconnu des cellules sanguines et de l'immunité, il est aussi le grand ami des microbes, propagateurs de grippe, angine, bronchiolite et maintenant covid-19. Ils ont l'art de s'inviter au moindre courant d'air par une belle journée glaciale. Dans les faits, on ne prend pas froid, mais « *les virus survivent plus longtemps dans un air sec et froid. Ils se reproduisent bien et il en circule davantage* », explique Isabella Annesi-Maesano, professeure d'épidémiologie environnementale. De plus, « *l'air sec de l'hiver irrite les muqueuses et les rend davantage susceptibles d'être infectées* ». S'ajoutent d'autres facteurs de propagation: le confinement dans des logements insuffisamment aérés, ou encore la pollution atmosphérique, qui, elle aussi, agresse les muqueuses.

**Calcul de la température humide:** sciav.fr/temperature_humide

« *En santé respiratoire, des corrélations avec les variables météorologiques ont été mises en évidence. En cas d'orage, par exemple, pour des pathologies comme le pneumothorax, qui peut être lié à la baisse subite de la pression atmosphérique, ou pour un type de crise d'asthme que l'on appelle "asthme d'orage". Le brouillard a également un impact sur l'asthme. Il favoriserait le développement des moisissures et acariens, qui ont des propriétés allergéniques. Les moisissures émettent elles aussi des composés organiques volatils agressant les muqueuses* », précise la spécialiste. Par ailleurs, des facteurs de risque environnementaux sont en jeu dans certaines maladies respiratoires, qui peuvent être exacerbées par des phénomènes météo, comme la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), une maladie sensible aux températures froides ou chaudes.

S. MATECKI

**« À 100 % D'HUMIDITÉ, AU-DELÀ DE 36 °C, L'ÉVAPORATION DE LA SUEUR DEVIENT IMPOSSIBLE. À 45 °C, LA SURVIE NE DÉPASSE PAS QUELQUES HEURES »**

**Stefan Matecki,** professeur de physiologie clinique, CHU de Montpellier

## La température de bulbe humide, indice de chaleur universel

Mais plus que le froid ou la pollution, pour la plus grande partie de la population mondiale, c'est la forte chaleur qui est dangereuse, *a fortiori* lorsqu'elle s'accompagne d'un degré d'humidité élevé. Dans un article publié en 2020 dans *Science Advances*, le climatologue américain Colin Raymond a recensé les zones du globe où la température dite « humide » atteint ou dépasse 35 °C, soit 40 °C et 75 % d'humidité relative. L'humidité relative mesurée par les météorologues étant le rapport de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la quantité de vapeur d'eau maximale possible. Au-delà de ce seuil, une personne en bonne santé ne pourrait survivre que six heures.

« *Ce chercheur de l'université de Californie à Los Angeles a remis au goût du jour en 2017 la notion de* "wet bulb temperature" (température de bulbe humide, ndlr) *ou WBT* », raconte Sarah Safieddine, chercheuse CNRS au Latmos (Laboratoire atmosphères, observations spatiales). Ce paramètre a été conçu dans les années 1970 afin de calibrer les exercices des soldats américains en conditions extrêmes. Il permet d'affirmer qu'un air très chaud mais sec est mieux supporté qu'une température plus basse associée à un trop fort degré d'humidité.

« *Expérimentalement, la WBT est mesurée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un tissu imbibé d'eau.* » Loin de positionner partout des « thermomètres mouillés », Sarah Safieddine travaille avec des données satellite couplées à celles de stations

**Avec la hausse globale des températures,** certaines populations de l'Inde (ici, à Calcutta), du Sahel ou de la péninsule Arabique connaissent déjà des épisodes caniculaires toujours plus longs et plus intenses, mettant les organismes à rude épreuve.

SUDIPTA DAS / NURPHOTO VIA AFP

au sol. Plusieurs formules chiffrent la température humide. La plus simple : ¾ de température en degrés C + ¼ de coefficient d'humidité en pourcentage. « *La température de bulbe humide est une sorte d'indice de chaleur universel, facile à comprendre* », ajoute la chercheuse. En 2022, elle a montré qu'il existe des risques vitaux significatifs pour les populations de la péninsule Arabique.

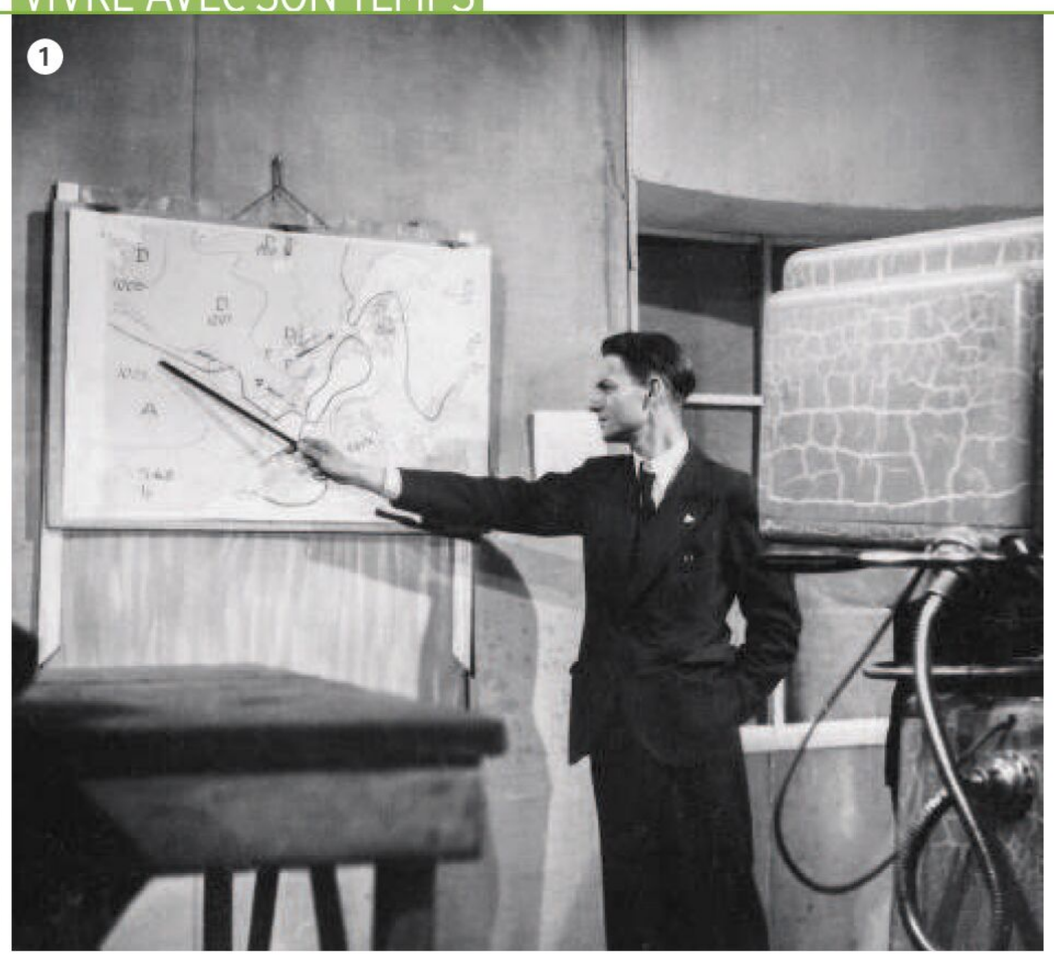
L'échelle de résistance de l'organisme est difficile à définir. Les études ont souvent porté sur des militaires ou sportifs de haut niveau. Guillaume Chevance, de l'Institut de santé globale à Barcelone, mesure quant à lui l'impact de la chaleur « en vie réelle » sur le sommeil de travailleurs en plein air, fermiers ou installateurs de panneaux solaires. À l'aide d'une bague connectée, il relève certains paramètres : mouvements, fréquence cardiaque, assortis de données issues de questionnaires portant sur la qualité de sommeil et de vie. « *Les résultats convergent vers une incidence négative d'une température élevée. D'autant plus lorsque le taux d'humidité augmente, car il influe la thermorégulation* », indique le chercheur.

En effet, afin de prévenir une hausse critique de la température corporelle, « *l'organisme développe des mécanismes d'adaptation multiples* », explique Stefan Matecki, professeur de physiologie clinique au CHU de Montpellier. Transpiration d'abord, puis diminution de l'activité des cellules et des organes, « *comme si notre corps se mettait en état d'hibernation* » afin de produire le moins de chaleur possible. Les comportements s'adaptent également. Ainsi, lorsque la température extérieure est élevée, l'alimentation et l'activité physique décroissent. C'est un mécanisme de survie, car au-delà de 42 °C de température interne, les cellules, notamment nerveuses, commencent à mourir. Dans un environnement très sec, si l'on boit beaucoup, la sudation permet alors d'évacuer la chaleur, et le corps peut résister longtemps à des températures même supérieures à 45 °C. « *Mais si l'évaporation ne peut se faire, la survie est menacée. À 100 % d'humidité, elle est impossible pour des températures au-delà de 36-37 °C. Ainsi, à 45 °C sans protection, la survie est de quelques heures, le temps que la température interne de notre corps dépasse 42 °C.* » L'ennemi est donc moins le froid que la chaleur humide extrême qui menace de nous cuire à petits bouillons… **VALÉRIE HANDWEILER**

**La raison des dictons**

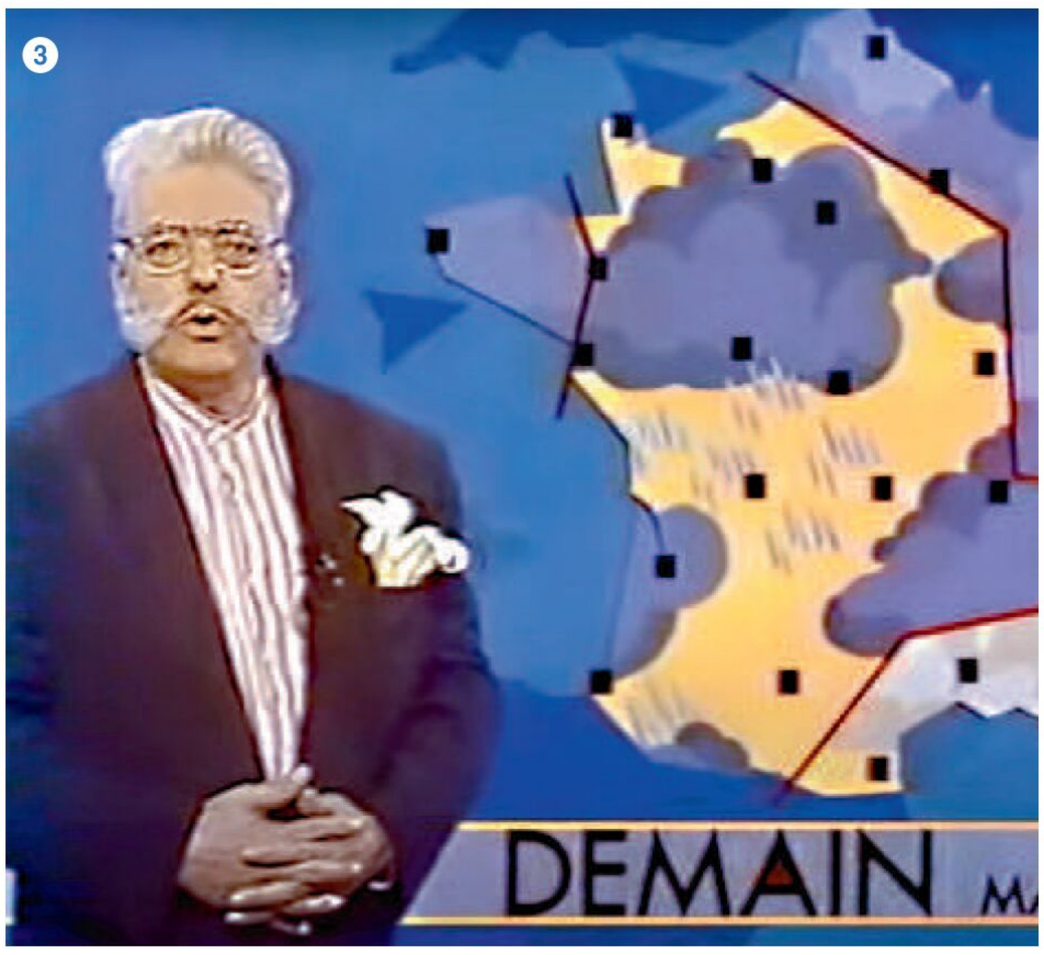
### Vent grec, pluie au bec

Si moult dictons basés sur des observations s'appliquent à de vastes régions de l'Hexagone, d'autres ne concernent qu'un périmètre plus restreint. Ainsi, dans la région de Narbonne (Aude), le « grec » désigne un vent de secteur est. Une appellation locale du « marin », ce souffle de sud-est qui peut être tempétueux et annonciateur de très fortes précipitations au nord-ouest de la Méditerranée, les fameux épisodes cévenols. Mais attention, le « grec » désigne aussi un vent parfois violent qui souffle du nord-est sur l'ensemble de la Méditerranée française. Dans le Languedoc-Roussillon, ou en Corse, il peut apporter de la pluie… alors qu'en Provence, il est froid et sec et peut même délivrer quelques gelées printanières. **D. Dq**




MÉTÉO FRANCE

SIPA




TF1

SIPA

**1.** Paul Douchy, le pionnier (Radiodiffusion française, 1946). **2.** Alain Gillot-Pétré, le facétieux (Antenne 2, La Cinq et TF1, 1981-1999). **3.** Michel Cardoze, le poète (TF1, 1987-1991). **4.** Évelyne Dhéliat, la doyenne (TF1 et LCI, depuis 1991).

# Ils font la pluie et le beau temps à la télévision

En quelques décennies, le bulletin météo s'est imposé comme un rituel immanquable rassemblant des millions de fidèles. Avec une présentation très codifiée, des cartes toujours plus animées et, bien entendu… ses vedettes.

Qui n'a pas en mémoire les dictons d'Alain Gillot-Pétré, les prévisions poétiques de Michel Cardoze ou la bonne humeur d'Évelyne Dhéliat ? Ces présentateurs vedettes ont marqué leur époque. « *Ils ont un fort capital de sympathie,* explique Audrey Cerdan, rédactrice en chef climat à France Télévisions. *Ils expliquent aux téléspectateurs avec bienveillance et de manière accessible des phénomènes qui se produisent près de chez eux et qui ont un impact sur leur vie quotidienne.* » Depuis sa première diffusion le 17 décembre 1946 – d'abord hebdomadaire puis quotidienne à partir de 1958 –, le bulletin météo s'est peu à peu imposé dans

**FRANÇOIS GOURAND**

Prévisionniste médias à Météo France

# « Alerter est au cœur de notre métier »

**D'où vient votre vocation de météorologiste ?**
J'ai toujours aimé observer les nuages mais j'ai d'abord choisi des études d'informatique. Pour me rendre compte, à la fin de ma formation, que ce métier n'avait pas assez de sens pour moi… À l'époque, il y a une vingtaine d'années, on commençait à parler du changement climatique, et je voulais travailler dans le domaine de l'environnement, être utile. J'ai donc décidé de me diriger vers la météo. J'ai rejoint Météo-France en 2005, et c'est là que j'ai pu assouvir mon envie de comprendre comment fonctionne le monde tout en rendant service à la communauté. Nous sommes un service public : alerter et prévenir est au cœur de notre métier.

**De cette vingtaine d'années à étudier la météo, quel est votre meilleur souvenir ?**
J'ai eu la chance de participer à deux expéditions scientifiques en Antarctique, en 2009 et 2020. J'étais chef de la station météo de la base Dumont d'Urville en Terre Adélie. J'ai passé là-bas deux années passionnantes dans des conditions

METEO FRANCE

extrêmes… et avec des journées bien chargées. Je m'occupais des prévisions météo, j'effectuais des observations en lâchant des ballons-sondes pour analyser la température en altitude, et je réalisais des études sur l'évolution du climat et de la banquise.

**Depuis que vous êtes rentré au chaud dans l'Hexagone, vous êtes « prévisionniste médias ». En quoi consiste votre métier ?**
Notre particularité, à moi comme à mes collègues spécialisés dans ce domaine, c'est que nous ne faisons pas directement de prévisions. Notre rôle est de les mettre en forme de manière à ce que les médias puissent les exploiter simplement, et d'accompagner ces derniers dans la diffusion des informations.

**Quels ont été les moments les plus marquants de votre carrière ?**
Malheureusement, ceux qui ont causé des victimes, malgré toute l'énergie déployée pour alerter la population. Ce sont des événements qui nous affectent à jamais. Comme lors de la tempête Ciaran qui a touché la Bretagne et la Normandie en novembre dernier, et qui a coûté la vie à trois personnes. J'espère que notre travail aura permis d'éviter d'autres tragédies.

**Vous diriez que c'est un métier difficile ?**
Il est surtout inquiétant de constater que, de plus en plus, les prévisions météo suivent les projections en matière de climat. Certains matins, il est difficile d'avoir le moral. Mais notre métier est de communiquer ces éléments pour que chacun en fasse le meilleur usage. Alerter sur le réchauffement climatique fait aussi partie de notre mission.

**PROPOS RECUEILLIS PAR NICOLAS GUTIERREZ C.**

les foyers. Aujourd'hui, ceux de TF1, France 2 et France 3 réunissent, après le journal télévisé du soir, jusqu'à 10 millions de téléspectateurs.
Les supports visuels ont évolué – les cartes de France aimantées en noir et blanc ont laissé place aux animations satellite. « *Plus les outils de représentation s'améliorent, plus le téléspectateur s'approprie les notions météorologiques, parfois abstraites,* note Audrey Cerdan. *L'arrivée de la 3D et de la réalité virtuelle permet d'approfondir les explications*. »
Le contenu même du bulletin météo s'est enrichi. Depuis la tempête qui a dévasté la France en 1999, les présentateurs commentent des cartes de vigilance et relaient des messages de prudence. Au point que France Télévisions a décidé en mars 2023 de compléter son traditionnel bulletin météo par un volet climatique, en donnant notamment la parole à des scientifiques. « *Un tel rendez-vous permet de montrer que le risque climatique n'est pas une fatalité et de mettre en lumière les solutions d'adaptation et d'atténuation* », se réjouit le climatologue Christophe Cassou, parrain de ce nouveau programme. D'autant plus que, selon un rapport de la Fondation Descartes publié en novembre 2022, les Français font plus confiance aux scientifiques qu'aux journalistes en matière de climat… **RIVA BRINET-SPIESSER**

**La raison des dictons**

**« Ciel pommelé, femme fardée ne sont pas de longue durée**

**La formule n'a pas d'âge puisqu'on la trouve déjà dans un dictionnaire de 1732. Passons sur la misogynie de bon nombre d'expressions héritées du passé. L'aspect pommelé du ciel tient à la présence d'altocumulus, des nuages qui naviguent entre 2 000 et 6 000 mètres d'altitude. Ils annoncent souvent le mauvais temps, se transformant progressivement en nimbostratus, générateurs de pluies peu intenses mais qui arrosent de vastes espaces. D. Dq**

PAGE RÉALISÉE PAR NICOLAS HALLEUR

# À la maison ou en balade, jamais sans mon app !

Plus ou moins fiables, plus ou moins complètes, parfois destinées à des spécialistes mais toujours accessibles... Pour les accros aux prévisions, il existe des dizaines d'applications météo. Notre sélection.

## 1 La Météo Agricole

Ensoleillement, bilan hydrique, éphéméride, cycle lunaire... Une appli et un site dédiés aux agriculteurs mais qui séduit un public toujours plus large. Lisibles en un coup d'œil et très précises géographiquement, ces prévisions détaillées (heure par heure jusqu'à 72 heures sur l'appli) se révèlent quasi infaillibles. Une version payante (35€/an) permet de supprimer les publicités et d'obtenir un luxe de détails à diverses échéances (par tranches de 15 minutes sur les trois prochaines heures, heure par heure sur 7 jours, par tranches de trois heures sur 14 jours...).

**Fiabilité : Imbattable**

**⊕ L'ergonomie, la précision et la concision. L'onglet « pluie dans l'heure » qui, par tranche de 15 minutes, permet d'anticiper la durée et l'intensité des précipitations.**

## 2 MeteoBlue

Les informations sont issues du modèle météorologique suisse NMM. Ses atouts : une résolution de 4 kilomètres, des prévisions à 72 heures actualisées deux fois par jour et des animations graphiques de grande qualité sur la vitesse du vent, les précipitations, la qualité de l'air, les pollens, etc. Des météogrammes prévisionnels à 14 jours annoncent les tendances par superposition de différents modèles à choisir.

**Fiabilité sur 3 jours : 5/5**

**⊕ Prévision des précipitations dans un rayon de 20 kilomètres ; choix du lieu directement sur une carte ; proposition de lieux plus ensoleillés à proximité ; prévisions thématiques (payantes) pour l'agriculture, l'aviation, le parapente, le surf, la navigation.**

**⊖ Prévisions gratuites « seulement » à 7 jours (au-delà, version payante à 3 €/an) ; publicités envahissantes.**

## 3 MeteoRed
**ou le site web équivalent tameteo.com**

Ces plateformes utilisent les données issues du modèle du Centre européen pour la prévision météorologique à moyen terme (CEPMMT). Un menu exhaustif propose l'essentiel heure par heure et des prévisions à plus long terme (3 jours, 15 jours) sous forme de graphiques. Le point fort est l'animation satellite en temps réel : un planisphère où faire jouer différents paramètres (circulation atmosphérique, houle, pollution, foudre...). Enfin, une fonction permet de partager en temps réel sa météo locale.

**Fiabilité sur 3 jours : 4/5**

Très peu d'erreurs, mais des icônes parfois en décalage avec la réalité.

**⊕ Les graphiques interactifs ; la carte des paramètres ; la version sans publicité (6 €/an).**

**⊖ Manque de précision du radar de pluie ; publicités trop nombreuses sur la version gratuite.**

## 4 Yahoo Meteo

Simple et ergonomique, cette appli développée par AccuWeather, géant américain réputé pour sa fiabilité, s'appuie sur les données issues des services nationaux et publics de météo. On y trouve l'essentiel sur 5 jours (températures, précipitations, indice UV, qualité de l'air, etc.) en déroulé heure par heure et jour par jour. Ainsi que le niveau des pollens et le temps des principales villes du monde.

**Fiabilité sur 3 jours : 4/5**

Nous avons constaté de rares écarts entre la prévision et la réalité.

**⊕ L'ergonomie ; l'exhaustivité des informations lisibles sur une seule page.**

**⊖ Le manque de précision de la localisation par coordonnées GPS.**

### Pour aller plus loin

Incontournable, évidemment, le site bien connu de Météo-France. Mais intéressant aussi, le site Meteo-Contact qui propose, en plus des prévisions, des cours de météorologie pour devenir un expert. Ainsi que les tendances à trois semaines, l'explication des modèles et leur construction, mais aussi la classification des nuages, l'origine des mouvements atmosphériques, un historique des records de température depuis 1950 et des tempêtes les plus marquantes depuis 1980, des vidéos de phénomènes allant du survol de lacs gelés dans les Pyrénées aux tornades américaines... et pour agrémenter les conversations : les dictons météo.

DU 13 AU 25 SEPT. 2024

# IMMERSION DANS LE GRAND NORD CANADIEN

## EXPÉDITION GROENLAND - TERRE DE BAFFIN LABRADOR - TERRE NEUVE

**AMIS DU GRAND NORD,** que les seuls noms de Groenland, Nunavut, Saint-Pierre et Miquelon fascinent, ce voyage est pour vous !

Bien sûr, il faudra vous armer de quelque patience et pratiquer un habile exercice mémotechnique pour retenir ceux de Kangerlussuaq, Qikiqtarjuak ou encore Nachvaq, escales parmi la douzaine que nous découvrirons lors des 13 jours d'expédition entre la grande île européenne et le Canada puis la France du bout du monde... Une occasion exceptionnelle de franchir le cercle Arctique, jouir de la beauté de paysages uniques, clarté des eaux, scintillement du glacier d'un fjord proche du parc national d'Auyuittuq.

Nous aurons la chance d'être en compagnie de Rémy Marion, que certains d'entre vous connaissent bien, membre de la société de Géographie, de la société des Explorateurs français, pour effectuer ce périple unique. Spécialiste des ours, auteur des « Métamorphoses de l'ours polaire » et de « Fort comme un ours », ce sera un guide naturaliste de premier ordre, décryptant aussi bien les secrets des ursidés que des glaciers, des morses ou des guillemots mais également prompt à nous rappeler l'épopée des Vikings ou les mythes des Inuits.

L'aboutissement du voyage, quatre jours entre l'Anse-aux-Meadows, Gros Morne à Terre-Neuve, et enfin Saint-Pierre et Miquelon devrait constituer une découverte exceptionnellement émouvante pour beaucoup d'entre nous.

**Dr DOMINIQUE LEGLU**
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

AVEC LA PARTICIPATION DE [2]
**RÉMY MARION**, Guide, conférencier, spécialiste des ours
ET **DOMINIQUE LEGLU**, Directrice éditoriale de Sciences et Avenir

13 JOURS / 12 NUITS À BORD DE L'EXPLORIS ONE
À PARTIR DE **8 990 €/PERS.** EN TOUT INCLUS [1]

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur **www.sa-expedition.fr**
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

[1] Voir détails sur la brochure [2] Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Concept Graph. Atelier Pascale M (26) Photos © Destination Canada_c180002_004 - Nunavut - A9116678

assystem

# ENVIE DE SWITCHER ?

**ASSYSTEM RECRUTE 2 500 NOUVEAUX COLLABORATEURS EN 2024 EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL, DONT PLUS DE 1 500 DANS LE SECTEUR NUCLÉAIRE**

Postulez ici :

**Rejoignez la communauté des Switchers et contribuez à accélérer la transition énergétique !**

## Le futur de l'industrie nucléaire commence avec vous !

D'ici à 2030, la filière nucléaire française devrait recruter plus de 100 000 personnes, notamment pour répondre aux enjeux liés à la construction des futurs EPR2, un programme essentiel pour lutter contre le dérèglement climatique. En effet, la production d'une électricité bas-carbone, pilotable et abordable issue de l'énergie nucléaire est clé pour accélérer la transition énergétique.

Chez Assystem, 3ème ingénierie nucléaire dans le monde, nous recrutons chaque année 1 500 talents pour accompagner nos activités nucléaires ainsi que 300 stagiaires et alternants. Saisissez l'opportunité de contribuer à la transition énergétique en rejoignant notre entreprise qui vous offrira de nombreuses opportunités professionnelles !

Nous vous donnerons les moyens de monter en compétence et en responsabilité : nos salariés bénéficient de 100 000 h de formation par an et 70% de nos managers sont issus de la promotion interne. Vous n'avez pas d'expérience dans le nucléaire et vous êtes demandeur d'emploi ? Nous vous accompagnons ! En collaboration avec France Travail (ex Pôle emploi), nous proposons un programme de formation permettant de développer les compétences nécessaires afin d'évoluer au sein de la filière.

**Construisez votre carrière dans le nucléaire chez Assystem !**